

ОБЗОР ПО ЗАДАЧАМ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЛ И ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С. А. НАЗАРЕНКО, НТУ "ХПИ"

Классификация подходов к решению задач анализа многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов

При решении задач оптимизации многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов необходимо исследование проблем динамического контактного взаимодействия, повреждения и разрушения; трения, износа и смазки, надежности (долговечности, безотказности, сохраняемости, ремонтпригодности, усталости, износостойкости и коррозии) машин, их деталей, узлов триботехнических систем [1, 7, 14, 16, 22, 32, 36, 39, 47, 48, 63].

Как многокомпонентные конструкции, так и технологические системы для обработки неоднородных материалов, функционируют в условиях тепловых, механических, электромагнитных, аэро- и гидродинамических, акустических и радиационных нагружений с учетом факторов контактных взаимодействий и разрушений, мало- и многоцикловой усталости, концентрации напряжений, многообразных разновидностей изнашивания [2-3, 20, 35, 37, 60, 72].

Структуру уравнений, характеризующих математические связи между искомыми и заданными величинами, обуславливает состав многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов, граничные условия, нагрузки, тип исследуемого процесса и условия сопряжения [14, 36, 63, 124, 157].

При анализе и синтезе многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования на составляющие подпроцессы, для описания которых используются аналитические или имитационные модели [7, 41, 80, 99, 109, 125].

Задачи анализа [3, 27, 30, 35, 39, 46, 70, 72, 78, 81, 94, 110, 135, 143, 148], используемые при проектировании многокомпонентных конструкций и

технологических процессов, используемых для обработки неоднородных материалов; можно классифицировать по следующим ключевым качествам:

1. процесс деформации: статический; динамический: циклический (собственные колебания, вынужденные, нерезонансные и резонансные нестационарные), высокоскоростное деформирование, действие импульсных электромагнитных или радиационных полей, ударное воздействие, взрывные нагрузки; комбинированный;

2. анизотропия материала: изотропия, ортотропия, общая анизотропия и т.д.;

3. определение нагрузки: заданное, зависящее от взаимодействия объекта с активной средой (газом, жидкостью) или физическими полями (температурное, электромагнитное), случайное;

4. физические закономерности деформирования: упругое, пластическое, вязкоупругопластическое;

5. численный метод расчета и форма разрешающих уравнений: краевая задача для системы дифференциальных уравнений; матричная проблема, к которой приводят вариационные и конечноэлементные методы.

Выбор расчетной математической модели обусловливается необходимой точностью исследования и особенностями изучаемой конструкции или ее элемента (одномерная, двумерная, трехмерная модель; специфика геометрии и т.д.) [3, 30, 39, 70, 78, 94, 135, 148].

В каждом из типов моделей многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов можно подвергнуть анализу более частные уровни [27, 35, 46, 72, 81, 110, 143]:

1. – балки (стержни);
2. – пластины различной конфигурации в плане (круглые, прямоугольные и т.п.);
3. – оболочки (цилиндрические, конические и др.);
4. – панели (часть замкнутых оболочек различной конфигурации);
5. – трехмерная задача теории упругости (полупространство; массивное тело).

При решении задач необходимо учитывать различные виды нелинейностей (физических; геометрических; контактных; “наследственных” (“генетических”), связанных с учетом прогрессирующего повреждения и разрушения материалов; появляющимися на одном технологическом этапе полями и передающимися на последующие и прочих) [14, 36, 63, 124, 157].

В настоящее время разрабатывают и используют эффективные математические модели многокомпонентных конструкций и

технологических систем для обработки неоднородных материалов, обладающие высоким уровнем адекватности реальным объектам и физико-механическим процессам, реализуют решение многомерных исследовательских и промышленных задач, описываемых, как правило, нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных в пространственных областях сложной формы [7, 35, 41, 80, 99, 109, 125].

Задачи динамического контактного взаимодействия многокомпонентных тел неоднородной структуры

Значимость исследования динамического контактного взаимодействия многокомпонентных тел неоднородной структуры обуславливается, как практическими потребностями современной техники, так и необходимостью теоретического объяснения экспериментальных результатов [1, 14, 20, 22, 109, 160]. Теоретические разработки методов расчета динамического контактного взаимодействия многокомпонентных тел неоднородной структуры позволяют обоснованно определить целесообразную программу экспериментальных исследований со значительным сокращением объема расходов.

Основными свойствами задач динамического нагружения многокомпонентных тел неоднородной структуры являются физическая и геометрическая нелинейность процессов деформирования, маленький размер локализованных областей контактного взаимодействия или зон протекания процессов относительно размеров конструкций; тепловыделение, изменение состояния материалов, объемный характер изучаемых явлений и т. д. [20, 35, 39, 109].

Математическая модель динамического нагружения многокомпонентных тел должна комплексно учитывать физико-механические свойства современных конструкционных материалов, трехмерное нестационарное упругопластическое деформирование, взаимную геометрическую нелинейность и связь локальных пластических деформаций с повышением температуры.

Исследование задач динамического нагружения многокомпонентных тел и технологических процессов требует как применения математического аппарата высокого уровня, так и проведения сложных экспериментальных изысканий всё более «тонких» особенностей современных конструкционных материалов, трансформирующихся в зависимости от температуры,

интенсивности и скорости деформации в пространстве и времени [39, 78, 122]. Существенные результаты были получены в работах, проведенных в ИПП, ИМех, ИЭС, ИСТМ и ИПМаш НАН Украины, НТУ ХПИ, НТУ КПИ и других отечественных и зарубежных научно-исследовательских центрах.

Итоги систематических исследований процессов динамической деформации различных материалов представлены в работах К. Альбертини, А. Брагова, А. Новикова, В. Пруда, Д. Филда, Р. Грея, Я. Клепачко и др. [81, 94, 96]. Для обширного класса неупругих сред основные определяющие соотношения были получены на базе общих термодинамических соотношений и феноменологических постулатов типа гипотез о максимальной пластической работы, постулата Драккера, принципа наименьшей необратимой силы и прочее.

Математическому моделированию и экспериментальному исследованию многокомпонентных тел и технологических процессов, используемых для обработки неоднородных материалов, посвящено значительное число работ, включая обширные монографии, труды конференций (EURODYMAT, ICHSF, International Symposium on Impact Engineering и др., которые обобщаются множеством обзоров [19, 27, 39, 46, 78, 81, 94, 96, 122].

Для отображения соотношений на этапе нагружения между параметрами деформированного и напряженного состояний в динамике были предложены разнообразные зависимости (Кристеску, Соколовского - Малверна и др.). Определяющие соотношения Johnson - Cook (Джонсона - Кука), Zerilli - Armstrong (Зерилли - Армстронга), Oxley (Оксли), Cowper - Symonds (Купера - Саймондса) позволяют в широком диапазоне скоростей деформаций моделировать пластическое поведение материалов.

Идентификации и верификации определяющих соотношений посвящены труды А. Гавруса, Г. Джонсона, В. Рула, Г. Тейлора, В. Янга, М. Мейерса, Дж. Роха и пр.. Экспериментальные исследования выявили, что протекающие при термопластическом деформировании металлических конструкций процессы являются адиабатическими, а температурные деформации существенно влияют только в месте больших пластических [39, 81].

Параметр, обуславливающий долю работы деформации, переходящей в тепловую энергию, зависит от скорости деформации [122].

Достоверность результатов обеспечивается выбором при анализе адекватной расчетной сетки, позволяющей контролировать процесс численного счета и сходимость решения. Многие из программных

комплексов в одной модели позволяют поддерживать несколько формулировок: Эйлерову, Лагранжеву и SPH.

Достоинство Лагранжева подхода заключается в относительной простоте реализации условий на свободных и контактных границах, плюсом Эйлеровых схем является потенциал ведения расчетов процесса с большими деформациями. Стремление объединить достоинства обоих подходов привело к созданию гибридных методов типа SPH, используемых для решения задач взаимодействия тел [39, 126, 162].

Одним из аспектов изучения многокомпонентных структур является необходимость исследования совместного деформирования единой системы, в которую входят несколько элементов. Многочисленные исследования показывают, что более 80% случаев выхода из строя машин и механизмов обусловлено процессами, происходящими в области контакта соприкасающихся твердых тел [31].

Фактором, обуславливающим долговечность конструкций, становится величина контактных давлений ввиду увеличения относительных скоростей. Динамика контактного взаимодействия гладких или шероховатых тел многими исследователями считается наиболее сложной задачей, как в механическом, так и в математическом смысле, и соответственно наименее изученной проблемой механики деформируемого твердого тела [1, 14, 20, 22, 109, 160].

Вышесказанное обуславливает актуальность исследования проблем механики контактных взаимодействий, повреждений и разрушений; проблем трибологии (трения, износа и смазки); во многом обуславливающих надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, износостойкость, усталость и коррозию элементов машин, в т. ч. узлов трения и триботехнических систем [1, 7, 14, 16, 22, 32, 36, 39, 47, 48, 63].

При исследовании контактного взаимодействия сложнопрофильных тел при варьировании формы и размеров необходимо проводить многовариантный анализ распределения контактных давлений. Для решения задачи сопряжения деформируемых тел используются различные технологии и их комбинации: аналитические расчеты, основанные на усовершенствованной модели Герца; численные схемы метода конечных элементов (МКЭ); экспериментальные методики с применением чувствительных к давлению пленок [61].

Метод Герца позволяет проводить достаточно оперативную оценку контактных площадок и контактных давлений, но существенно сужает сферу

применимости требованиями о первоначальном точечном контакте тел и описании локального зазора в сопряжении положительно определенной квадратичной формой от координат общей касательной плоскости.

МКЭ требует на создание численных моделей больших затрат времени; однако обеспечивает для тел произвольной конфигурации конечных размеров высокую точность моделирования [161].

Задачи механики контактных взаимодействий деформируемых твердых тел, как правило, сводятся к решению интегральных уравнений. Метод граничных интегральных уравнений объединяет преимущества метода Герца и МКЭ. Он расширяет множество тел, ограниченных требованиями теории Герца, и оперирует со значительно меньшими в сравнении с МКЭ размерностями дискретных моделей [62, 84].

В статье [61] проблема контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел приводится к граничному интегральному уравнению. На основе граничных элементов реализована дискретизация искомого контактного давления. На базе упругого основания Винклера моделируется действие шероховатости. Асимптотические оценки получены для нахождения контактного давления.

При решении сложных задач механики контактного взаимодействия используются регулярные и сингулярные асимптотические методы, преимущества которых заключаются в применимости, как к линейным, так и нелинейным задачам; как к плоским, так и к пространственным (в частности, осесимметричным); компактности аналитических результатов; доступности их анализа и последующего применения; расширении класса решаемых в аналитической форме задач определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [1].

Как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе трудов, связанных с разработкой асимптотических методов решения нестационарных динамических контактных задач мало [68]. Впервые нестационарную динамическую контактную задачу на упругой полуплоскости для полубесконечного штампа решил Флитман, при этом показав направление исследований для конечного штампа.

Задачи о неупругом соударении деформируемых тел приводят в точной постановке к нестационарным контактным задачам. Подходы к решению зависят во многом от относительной скорости сближения тел [22, 109].

Анализ большого числа трудов показал, что первым этапом поиска асимптотических решений нестационарных динамических контактных задач является сведение неизвестных контактных напряжений, появляющихся

между упругой средой и штампом, к решению системы интегральных уравнений относительно трансформант Лапласа [19, 27, 46].

На второй стадии реализуется построение приближенных или асимптотических решений системы интегральных уравнений, представленных обычно в виде разложения по характерному параметру задачи. На основе полученного приближенного или асимптотического решения системы интегральных уравнений на третьей стадии строятся асимптотические решения нестационарных динамических контактных задач, достоверные в некоторой зоне изменения характерного параметра и времени [19, 27, 46, 68].

Разработке численных методов решения пространственных нестационарных динамических контактных задач посвящена большая библиография работы [14].

Изучение состояния области исследований, касающихся сложного контактного динамического нагружения подшипниковых узлов качения

Подшипниковые узлы качения являются как наглядным примером многокомпонентной структуры, так и наиболее распространенным сборочным узлом в машиностроении. Подшипниковые узлы качения (вал – внутреннее кольцо – ролики – сепаратор – внешнее кольцо – „адаптор”) осуществляют пространственную фиксацию роторов и передают статические и динамические усилия от вращающихся деталей на неподвижные опоры [8, 13, 31, 45, 64, 107].

Подшипники обуславливают конструктивно-технологическое совершенство, производительность, надежность, долговечность, скорость и сферу использования многих машин [31, 101]. Их повреждения являются причиной многообразных отказов, приводящих или к прекращению эксплуатации и ремонту машины или ее узлов, или на стадии проектирования к доработке.

Составные части подшипников в соответствии с работой [158] приведены на рисунке 1.

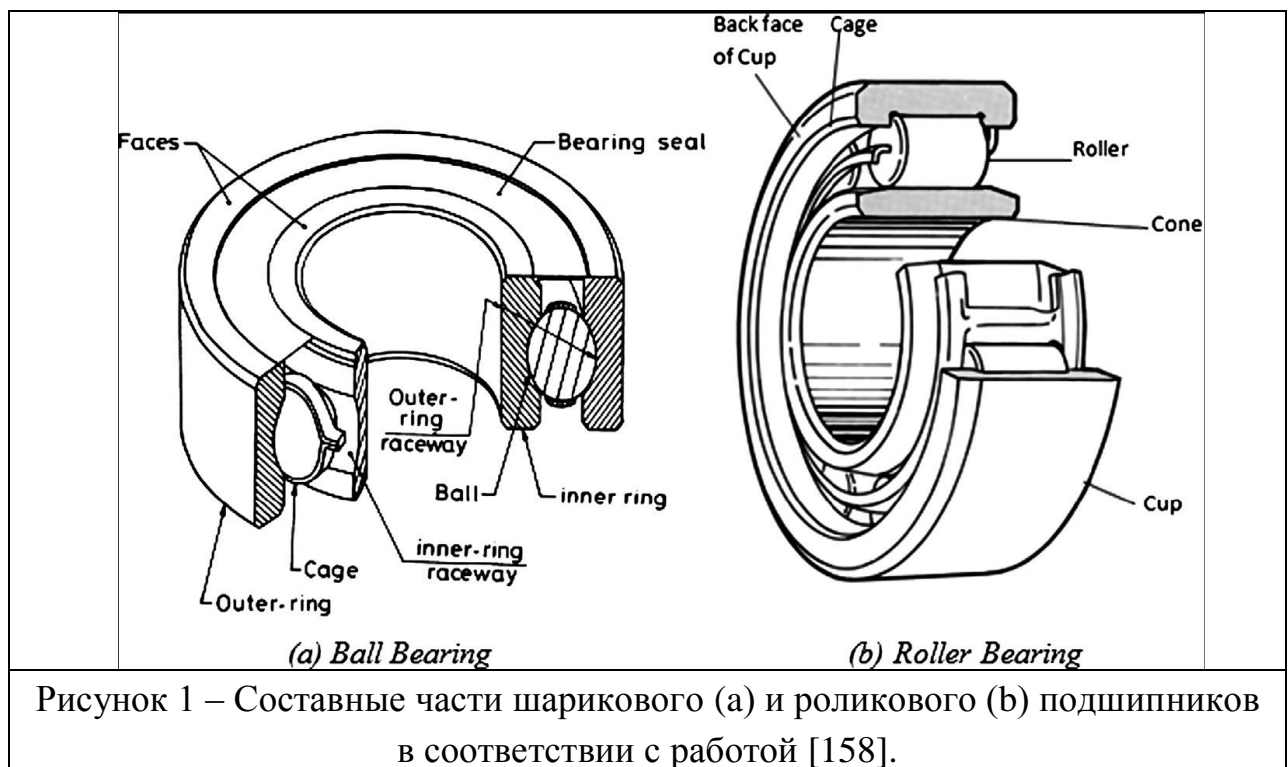
Основные виды неисправностей и дефектов подшипников можно классифицировать следующим образом [31, 75, 93]:

усталостные разрушения поверхности;

бриннелирование (пластические деформации металла, возникающие вследствие высоких статических или ударных нагрузок, неправильной технологии установки подшипника, сильных механических ударов);

выкрашивание поверхности;
 псевдобринелирование (результат сильных вибраций машины в нерабочем состоянии);
 абразивный износ;
 перегрев;
 атмосферная коррозия;
 раскалывание и раздробление деталей из-за большой перегрузки подшипника;
 фреттинг-коррозия;
 натир;

разрушение из-за дисбаланса;
 задиры на поверхности;
 несоосность колец;
 выбоины поверхности;
 повреждения при сборке;
 повреждение сепаратора из-за изгиба.



Проклассифицировать повреждения подшипников можно по следующим конструктивным, технологическим и эксплуатационным факторам [31, 75, 93]:

размеры и тип подшипника;
 диаметр, форма и количество тел качения;

технология изготовления и сборки подшипниковых узлов;
конструкция и материал колец и сепаратора;
класс точности изготовления;
начальный радиальный зазор;
конструктивные особенности посадок подшипника на вал
характер и качество смазки;
режимы работы подшипникового узла;

нагрузки (величины контактных напряжений) и частоты в
Различные варианты моделирования дефектов в п
соответствии с работой [136] приведены на рисунке 2.

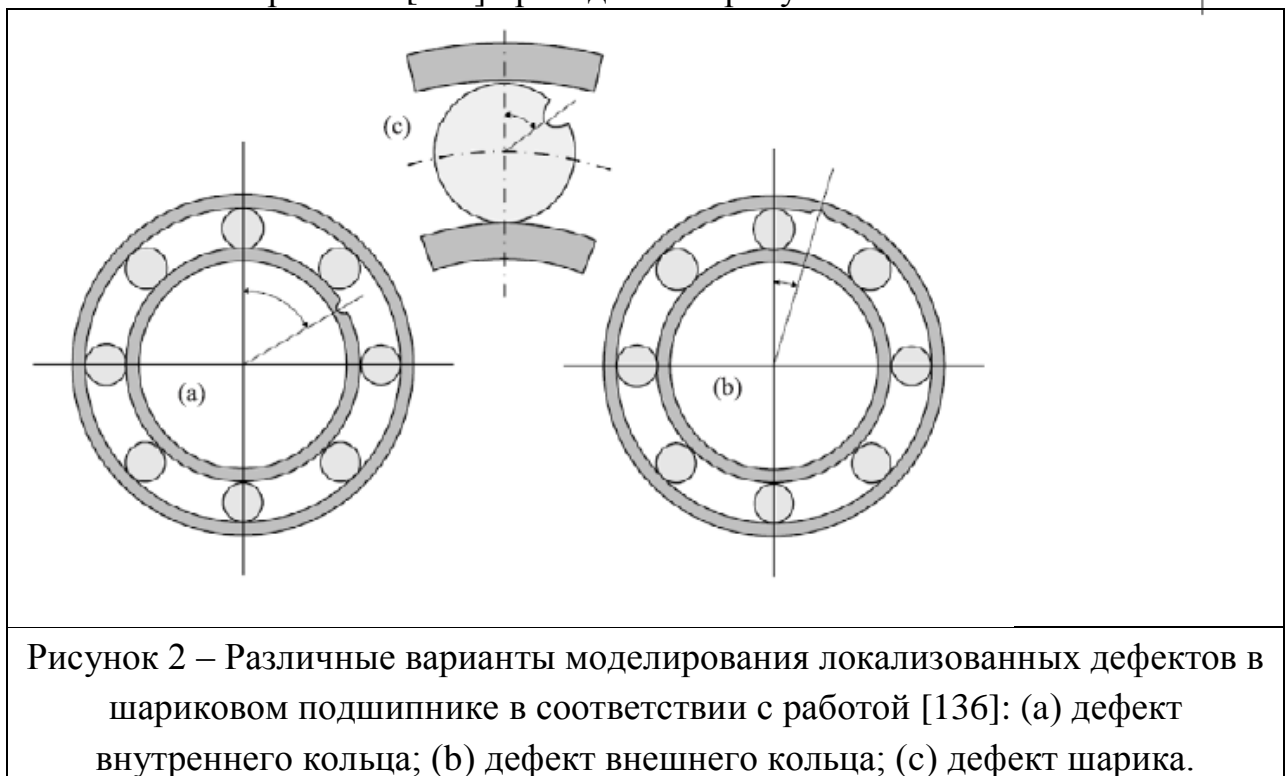


Рисунок 2 – Различные варианты моделирования локализованных дефектов в шариковом подшипнике в соответствии с работой [136]: (а) дефект внутреннего кольца; (б) дефект внешнего кольца; (с) дефект шарика.

Появляющаяся при функционировании подшипниковых узлов качения вибрация обуславливается большим количеством факторов и достаточно сложно структурирована [31, 76, 91, 137]. Анализ теоретических и экспериментальных данных о причинах вибрации подшипников качения, частотных и амплитудных диагностических особенностях и методиках распознавания погрешностей дан в работах [75, 92, 139].

Для оценки технического состояния подшипниковых узлов качения применяется 4 основных метода вибродиагностики: спектра огибающей, ПИК-фактора, ударных импульсов и прямого спектра. При этом исследуется общий уровень вибрации, частотный состав, соотношение между частотами и уровнями отдельных составляющих, статистические характеристики вибрационных процессов и т. д. [31, 131, 137, 139].

С применением созданного на базе вероятностно-статистических технологий и теории детерминированного хаоса метода реконструированных фазовых портретов обнаруживаются на ранних фазах формирования дефекты подшипниковых узлов качения. При этом проводится исследование статистических данных по наработке отказов; анализ влияния шумовой составной части на идентификацию основных частот вибрации подшипников; выбор критериев технического состояния; создание методики и с ее помощью вибродиагностика появляющихся дефектов [31, 75, 92, 131, 139].

Опубликованные методики выбора подшипников, представляющих стандартизованные детали, являются общими без детализации режимов работы конструкций машин и не гарантируют надежность в течение расчетного срока службы на 100 % [8, 13, 31, 45, 64, 107].

Анализ подшипников качения до настоящего времени основывается всего на двух расчётных критериях: статическая прочность по остаточным контактным напряжениям и долговечность (ресурс) по усталостному выкрашиванию [13, 31, 64, 88, 107].

Расчёты по иным критериям не разработаны, так как они связаны с рядом случайных факторов. Моделирование при этом выполняется с установлением ряда идеализирующих допущений [8, 13, 107].

Проектирование конструкций подшипников качения базируется на выборе их геометрических параметров по графикам, таблицам и эмпирическим соотношениям [13, 45, 64, 107]. Аналитические формулы приняты при упрощающих гипотезах, обычно существенно искажающих фактическую картину изучаемого процесса.

Соотношения в подшипниковых узлах качения устанавливают без учета воздействия многих факторов: действительной геометрии компонентов, зазоров, сложного характера нагрузки, смазки и т. д.

Расчет ресурса обычно не учитывает неравномерное распределение нагрузки как между телами качения и кольцами подшипника, так и между подшипниками в буксе; базируясь на допущении абсолютной жесткости тел [8, 9, 13, 31, 45, 64, 107, 111]. Однако, например, при действии ударных нагрузок на подшипники (например, при прохождении крестовин стрелочных переходов и рельсовых стыков) существенно ухудшаются условия контактного взаимодействия.

Проверочные расчеты прочности подшипников качения выполняются со значительными материальными расходами с использованием экспериментально найденных нагрузок и программных комплексов. Поэтому

актуальным является разработка теории и методов расчетов подшипников качения, улучшающих симуляцию контактного взаимодействия деталей [102].

В работах [18, 119] представлен общий подход к моделированию шпиндельных узлов на опорах качения и аргументирована необходимость при проектировании комплексного расчетного анализа их характеристик. Комплексная модель шпиндельных узлов включает частные: упруго-деформационные, тепловые, динамические, долговечности подшипников.

В работах [11, 13] подвергнуты рассмотрению оборудование для испытаний и методы физического моделирования трения и изнашивания роликоподшипников; предложены методы повышения износостойкости сепаратора и торцевого контакта.

В монографии [138] проанализированы разнообразные аналитические и конечно-элементные подходы к расчетам напряженно-деформированного состояния подшипников качения.

В монографии [48] отмечается, что автору не удалось найти расчетных методик подшипников качения, воспроизводивших всю специфику их работы и учитывающих всю систему воздействующих факторов.

В монографии [13] отмечается, что отсутствуют методы моделирования нагружения подшипника для изучения его кинематики и динамики; форсирования ресурсных испытаний; нагружения трибосопряжений; оценки прочности и износостойкости компонентов.

Рассмотрение подшипников качения в целом тесно связано с теорией циклически симметричных конструкций (ЦСК). Проблема анализа многокомпонентных конструкций с поворотной (циклической) симметрией, широко распространенных в механике и машиностроении, вызвала многократно интерес ученых [6, 24, 65, 73, 104, 140, 146].

Особенности ЦСК позволяют путем создания специализированных теорий и численных технологий перейти от общих методов анализа систем к специальным, существенно меньшей размерности. Отметим, что это требует формирования особых теорий и численных технологий. Проблема хорошо разработана и достаточно апробирована для случая симметричного нагружения систем, когда порядок симметрии геометрической структуры и нагрузки совпадают [65].

При расчетных исследованиях ЦСК применяются континуальные и дискретные модели. Континуальные позволяют учесть конструктивные особенности отдельных элементов и определить характеристики подшипников качения, как связанной системы.

Дискретные (с сосредоточенными параметрами) модели более просты и часто применяются для исследования эффектов отклонений от ЦСК, статистических параметров динамических и прочностных характеристик.

В работах Ю. С. Воробьева, А. П. Зиньковского, В. В. Матвеева, К. Н. Боришанского, А. С. Сердотецкого, а также зарубежных авторов - Дай, Генри, Эввинса, Вея, Пьера, Вагнера, Ювинза, Гриффина, Гусака, Эль-Байоми, Сринивасана и других рассмотрены и проанализированы методы прочностного и динамического расчета циклически симметричных конструкций, исследовано влияние неидентичности на частоты и формы колебаний систем, обладающих поворотной симметрией,.

Анализ научно-технической документации показал, что недостаточно исследованы проблемы сложного динамического контактного взаимодействия подшипниковых узлов качения (вал - внутреннее кольцо – ролики - внешнее кольцо - „адаптор”). Необходимо уточнение расчета за счет учета факторов второго порядка (сепараторы и прочие вспомогательные элементы подшипникового узла качения; учет динамики характеристик; варьирование свойств материалов)

Мало внимания в литературе уделено влиянию погрешностей формообразования и других технологических несовершенств при изготовлении и эксплуатации поворотно симметричных конструкций подшипниковых узлов качения на характеристики динамической и статической прочности, стабильность рабочих показателей.

Во всем мире технологии производства циклически симметричных конструкций подшипниковых узлов качения считаются "high-tech"[5, 57]. Их составные части считаются секретами производства. Вследствие этого технологические аспекты обеспечения прочности и надежности поворотно симметричных конструкций подшипниковых узлов качения все чаще выходят на первостепенные позиции в обстоятельствах рыночных взаимоотношений.

При всем том практически не исследованы анализ чувствительности динамических характеристик к малым изменениям глобальных и распределенных геометрических параметров, оценка влияния технологически допустимых отклонений от идеальной ЦСК на повышение динамической нагруженности (перегрузку) в предельной и статической постановках, выбор критериев динамической оптимизации; специфика условий оптимальности и соотношений анализа чувствительности для конечноэлементных моделей конструкций с поворотной симметрией.

Задачи механики контактного разрушения многокомпонентных тел

Подходы механики разрушения применяются для моделирования контактного повреждения. Становление механики контактного разрушения обычно отсчитывают или с опубликования работы F. C. Frank и B. R. Lawn, или фундаментального обзора по проблеме [113].

В монографиях [20, 32] с обзором большого количества первоисточников содержится подробный анализ состояния механики контактного разрушения. При взаимодействии твердых тел под площадкой контакта и вблизи от нее характерна геометрическая локализация упругой и пластической деформаций; зарождения и развития трещин. При динамическом контактном нагружении формируются следующие разновидности трещин: конус Герца, медианные, радиальные, боковые [20, 32].

Последовательность формирования трещин, их численность и размеры могут существенно различаться в зависимости от режимов нагружения и комбинации свойств материалов соударяемых тел. Задачи механики контактного разрушения по характеру нагружения можно классифицировать [20, 32] следующим образом:

- статические (упругие и упругопластические),
- динамические (упругие и упругопластические);
- циклические (усталостные).

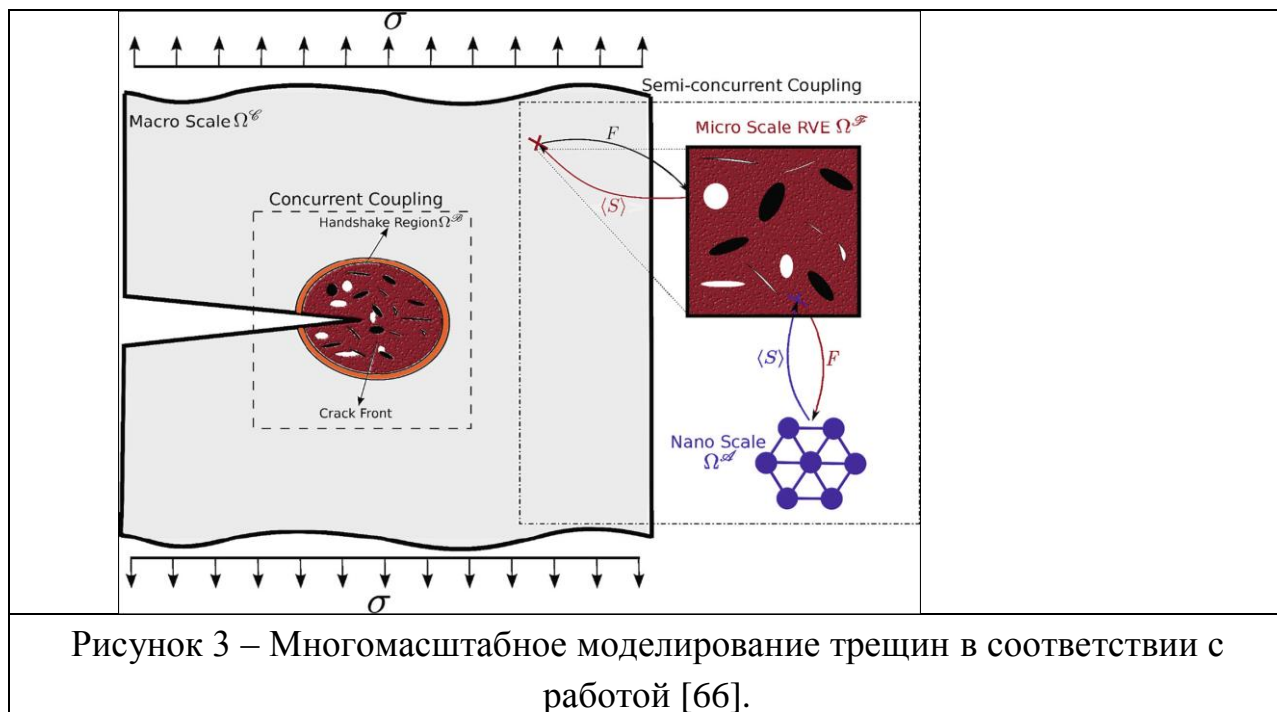
На основе классической формулировки механики разрушения проводится исследование процессов разрушения твердого тела в результате страгивания и распространения под действием различных причин магистральных трещин в континуальной среде. В обычной формулировке не рассматриваются существенные фазы деградации материала, накопления микрповреждений, зарождения исходной трещины (очага разрушения).

В механике контактного разрушения используются критерии Ирвина и Гриффитса. Многомасштабное моделирование трещин в соответствии с работой [66] приведено на рисунке 3.

Классифицируем проблемы механики контактного разрушения:

- оценка степени остаточных поверхностных напряжений;
- нахождение вязкости разрушения поверхностных слоев материала;
- определение параметров распределения поверхностных дефектов;
- описание трансформации траекторий поверхностных и подповерхностных трещин;

отображение взаимодействия системы трещин;
 установление критериев выкрашивания и оценка объемов фрагментов
 поверхностного слоя;
 построение моделей износа.



Приложение современных численных методов к задачам механики разрушения позволяет подвергать анализу все стадии процесса нагружения контактирующих тел. При этом необходимо привлекать совокупность методов физики прочности, механики деформируемого твердого тела, физического металловедения и т. д. [20, 32].

Исследование проблем трибологии (трения, смазки и износа) в контактных задачах многокомпонентных тел

Поверхности соприкасающихся компонентов машин при самой скрупулезной обработке включают начальные несовершенства, трансформирующиеся в процессе работы. Касательная составляющая вектора поверхностных усилий на границе деформируемого твердого тела является, как правило, количественной характеристикой сил трения.

Законами трения при нагружении компонентов машин именуют обычно формулировки, характеризующие изменение касательных составляющих вектора поверхностных усилий на границе деформируемых твердых тел. Силы трения зависят от величины нормального давления и от

относительной скорости скольжения в точке общей границы контактирующих тел. Эта зависимость в общем случае нелинейная [16].

В отличие от трения слоев жидкости граничное трение деформируемых тел имеет пороговый характер. Относительная скорость скольжения равна нулю, если значение величины касательной компоненты вектора поверхностных усилий на границе деформируемого твердого тела меньше предельного [16].

Для определения сил трения разрабатывают специальные методы. Первым корректным математическим выражением закона трения считается формулировка Амонтона, как правило, называемая законом Кулона [21].

В недостаточной мере исследованы в трехмерной постановке проблемы, связанные с нахождением участков проскальзывания и сцепления в контактных задачах с трением. Например, условия фрикционного взаимодействия принимаются в формулировке Амонтона с варьируемым коэффициентом трения. При этом компоненты поверхностных нормальных и касательных контактных напряжений связаны известными соотношениями, отображающими «скольжение» контактирующих участков конструкций [16].

При исследовании фрикционных контактных задач гладких тел несогласованной формы используется численный метод конечных элементов (МКЭ) [120].

Для нахождения величин усилий в типичных контактных задачах с трением, применяется полуаналитический подход, в котором записью условий для заданного комплекта точек в плоскости коллокации получается система разрешающих соотношений. „Шаблон” для пирамидального элемента формы распределения перемещений оптимальным способом удовлетворяет граничным условиям в узлах сетки [116].

Произвольный эйлерово - лагранжев подход в задачах тел качения показан в труде [115].

Моделированию процессов контакта с учетом трения качения также посвящены работы Baas, Batra, Chang, Faria, Endo, Kalker, Lin, Luchini, Oden, Padovan, Paul, Stechsdralte и др. [128].

Для анализа в процессе эксплуатации разнообразных состояний подшипника, как элемента трибосистемы, в работе [63] применяется обобщенный термодинамический подход оценки в характерных точках перехода значений коэффициента трения.

Эволюция трибосистемы передана характерной кривой трансформации коэффициента трения в зависимости от внешних параметров: скорости движения контактирующих поверхностей и контактного усилия. Отмечается,

что зависимость имеет общий вид для большого числа исследованных материалов, образующих пары трения, и для широкого диапазона изменения внешних параметров трения – так называемого активирующего фактора [63].

Первые стадии модификации состояния трибосистемы связаны с доминирующим вкладом в трение процессов повышения плотности скрытой энергии разнообразных дефектов, повреждений структуры контактных объемов и сопровождаются ростом коэффициента трения. При этом совершается деформационное упрочнение фрикционного контакта. Затем начинают доминировать процессы возврата энергии, что связано с освобождением и диссипацией энергии деформации и, значит, уменьшением плотности накопленной энергии [63].

Процессы сопровождаются изведением разнообразных элементарных дефектов противоположных знаков, выходом их на поверхность, залечиванием обратимых субмикроскопических нарушений сплошности и прочее. Данные процессы сопровождаются уменьшением коэффициента трения. Эти противолежачие составные части трения постоянно находятся конкурентной взаимосвязи. Коэффициент трения в общем случае эволюции трибосистемы закономерно характеризуется приспособляемостью [63].

Контактные задачи многокомпонентных тел при наличии износа

Контактными взаимодействиями в современном машиностроении обуславливаются процессы износа. При этом вследствие разрушения поверхности трения происходит удаление материала, проявляющееся в постепенной трансформации размеров и формы взаимодействующих компонентов машин [58, 82, 100].

Основные виды износа можно классифицировать следующим образом: усталостное, адгезионное и когезионное, коррозионно - механическое, абразивное, фреттинг - коррозия, кавитационное, эрозионное. Разнообразие условий нагружения при износе многократно усложняет проблему [58, 82, 100].

Нелинейность постановки износоконтактных задач вызывается рядом обстоятельств: нелинейностью закона изнашивания, трансформацией зоны контакта вследствие износа, фрикционным разогревом при взаимодействии, наличием покрытия и т. д. При моделировании процессы износа по сравнению с усталостью характеризуются большим количеством оказывающих влияние при эксплуатации факторов [82, 100].

Для анализа практически всех разновидностей износа применяют подходы механики разрушения, потому что воссоздание формирования частиц износа (фрагментов выкрашивания) является ее типичной задачей [58, 100].

В работах [58, 82, 100] описаны отдельные модели износа, сформированные на методиках механики разрушения: зарождение и формирование трещин фреттинг-усталости, появление ямок питтинга и износа отслаиванием, повреждение при скольжении поверхностей.

При математической постановке задач расчета подвижных сопряжений машин учет износа позволяет установить распределения давлений на площадке контакта, кинетику трансформации изношенной поверхности, длительность ступени приработки с интенсивным изменением макрогеометрии контакта, взаимное положение контактирующих компонент. Основные работы по плоским и пространственным контактными задачам термоупругости при учете тепловыделения от трения и износа можно классифицировать следующим образом [24, 67]:

стационарные задачи с фрикционным теплообразованием;

нестационарное взаимодействие упругих тел при наличии тепловыделения от трения;

износоконтактные задачи термоупругости с учетом фрикционного разогрева.

С целью ранжирования по износостойкости разнообразных материалов разработаны критерии при многообразных разновидностях износа, в которые введены параметры трещиностойкости. Контактные проблемы с учетом формоизменения поверхностей в зависимости от моделей, применяемых при постановках задач, сводятся к системе уравнений (дифференциальных, интегро-дифференциальных, интегральных), которая бывает как линейной, так и нелинейной [47].

Способы решения для упругих тел линейных контактных задач при наличии износа изложены в работах В. М. Александрова, Л. А. Галина, И. Г. Горячевой, М. Н. Добычина, Е. В. Коваленко, М. В. Коровчинского и др. [24, 47, 58, 67, 82, 100].

Проблема расчета износа сопряжений впервые была решена при гипотезе абсолютной жесткости контактирующих тел, после этого при степенной зависимости от контактного давления деформационной осадки поверхностей тел [47].

Первая постановка для упругих тел износоконтактных задач путем приложения к основному уравнению интегрального преобразования Лапласа по времени изложена в работе [23].

Модели износа, связанного с локальным оплавлением поверхности одного из движущихся взаимодействующих упругих тел, предложены в работах [2, 3].

Количество тепла, выделяемого в зоне контакта и направленного на расплавление поверхностного слоя, рассчитывалось пропорциональным при этом мощности работы сил трения. Для плоской и осесимметричной постановок задач при решении линейных интегральных уравнений применялись методы - преобразования Лапласа и сращиваемых асимптотических разложений [3].

Скольжение роликов оказывает значительное влияние на износостойкость подшипников качения. Разновидности скольжения на поверхностях качения колец буксовых роликоподшипников в соответствии с работой [13] представлены схемой на рисунке 4.



В настоящее время отсутствуют теоретические методы анализа износостойкости подшипников качения, а математическое моделирование работы подшипниковых узлов и подшипников качения не принято в качестве основного инструмента исследования из-за трудностей учёта многочисленных процессов смазки, трения и изнашивания деталей и ограниченных технических возможностей вычислительной техники. Поэтому экспериментальные методы в настоящий момент являются основными в исследовании подшипников качения [13, 31, 44, 92, 107, 131, 137, 139, 158].

Задачи контактно-гидродинамической теории смазки

При рассмотрении процессов в области контакта компонентов машин, образующих многообразные узлы трения, появляются проблемы контактно-гидродинамической теории смазки. Силы трения не равны нулю при существовании самой хорошей смазки (за исключением жидкого гелия в состоянии сверхтекучести) [48]. За счет усовершенствования эксплуатационных свойств смазки можно уменьшить тепловыделение при трении деталей многокомпонентных конструкций и увеличить их износостойкость.

Упругогидродинамическая смазка характеризуется существованием смазочной пленки, толщина которой больше в несколько раз высоты шероховатости поверхностей, и деформацией компонентов машин в зоне контакта [89].

Контакт в режиме упругогидродинамической смазки считается тяжело нагруженным, если давление в нем близко к герцевскому за исключением малых областей выхода и входа. Подшипники качения (шариковые, роликовые) являются типичными примерами узлов трения с сосредоточенными (точечными, линейными) контактами, функционирующими в условиях упругогидродинамической смазки. При проведении исследования асимптотическими и численными методами линейного упругогидродинамического контакта рассматривается задача в плоской постановке (точечного — пространственной) [48].

Система уравнений течения смазки в упругогидродинамическом контакте выводится из уравнений теории упругости, тепломассопереноса и гидродинамики с учетом ряда допущений [44, 48, 55, 105]. Ключевые из них состоят в следующем: силы вязкого трения существенно больше инерционных, толщина слоя смазки значительно меньше радиусов контактирующих компонентов, локально контактирующие деформируемые твердые тела заменяются полупространствами.

Для исследования необходимо располагать информацией о реологической модели среды; зависимости вязкости, теплоемкости, плотности, теплопроводности смазки от давления и температуры; физических свойствах твердых тел; топографии поверхностей. Начально-краевыми условиями замыкается система упругогидродинамических уравнений [105].

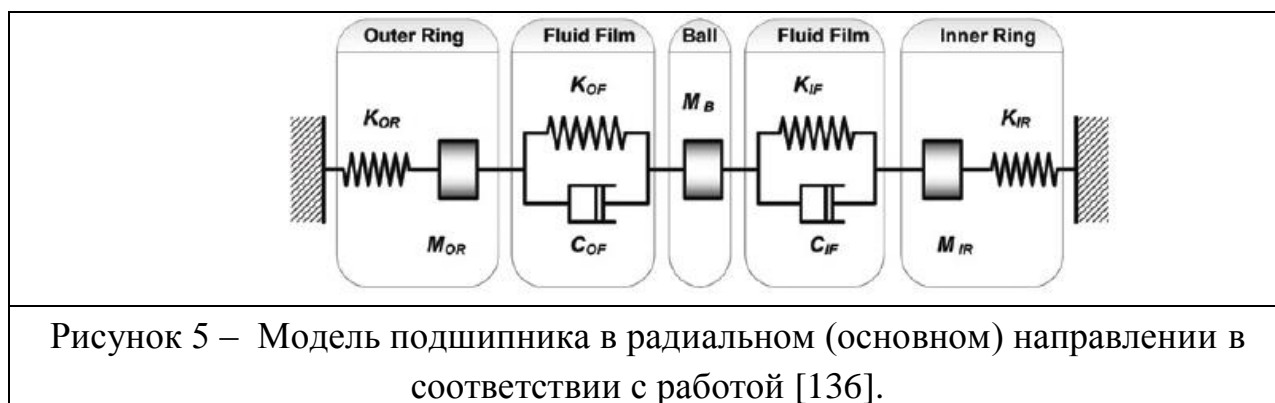
Задачи упругогидродинамической смазки относятся к классу нелинейных интегро-дифференциальных проблем со свободной границей. В ходе решения системы упругогидродинамических уравнений отыскивают распределения толщины смазочной пленки в области контакта; давления; температуры; свободную (выходную) границу, на которой появляются кавитационные явления. На базе полученных результатов определяются на контактирующих поверхностях распределения напряжений трения [48, 105].

Решение проблемы нестационарного качения деформируемого цилиндра при контакте со смазкой по жесткому полупространству дано в работе [28].

В работе [15] рассмотрены аналитические методы решения контактной проблемы качения по вязкоупругому слою, сцепленному с упругим основанием, упругого цилиндра. Модель Максвелла приложена для отображения механических свойств.

Гипотеза частичного на площадке контакта проскальзывания позволило провести изучение сопротивления перекачиванию как последствия трения скольжения на площадке контакта и несовершенной упругости поверхностных слоев деформируемых взаимодействующих тел. Решение проблемы скольжения по упругому основанию (с тонким вязкоупругим слоем) цилиндра было получено в качестве частного случая.

Постановки задач о повышении ресурса подшипниковых узлов качения, оценке работоспособности сопряжений их составляющих, выборе к смазке антифрикционных препаратов, параметрическому и структурному управлению эксплуатационными свойствами смазки даны в работах [12, 13, 44, 136]. Вариант моделирования подшипника в соответствии с работой [136] приведены на рисунке 5.



Для повышения долговечности роликоподшипника совершенствуют элементы узлов трения нанесением маслоудерживающих канавок в гнёздах

стеклополиамидного сепаратора для дополнительной смазки. Оптимизация его конструкции заключается в модификации геометрии окон сепаратора с повышением их численности; увеличении маслоёмкости опорных поверхностей колец [12].

В монографии [13] отмечается, что на сегодняшний день отсутствуют теоретические методики анализа износостойкости подшипниковых узлов качения. Экспериментальные технологии являются ключевыми в исследовании подшипниковых узлов качения из-за ограниченного потенциала доступной вычислительной техники, сложностей учета многочисленных процессов изнашивания, трения и смазки компонентов при математическом моделировании их работы.

Задачи оптимального управления процессами в технологических системах, используемых для обработки неоднородных материалов

К современным технологическим системам, используемым для обработки неоднородных материалов, относят обработку металлов резанием; химико-термическую обработку отливок в жидкофазовом состоянии; химико-термическую обработку в условиях энергетической поляризации, ультразвукового и электрических полей; лазерную и гидроабразивную резку заготовок; химико-термическую обработку в условиях низкочастотных акустических воздействий и т. д. [39, 60].

Основными преимуществами технологически инновационной обработки являются более высокие производительность и качество изготавливаемых деталей, сокращение количества ручных доводочных операций, снижение себестоимости изделий. При технологических инновациях необходимо использовать оптимальную комбинацию высокоэффективный инструмент - обрабатываемый материал [40, 143].

При проектировании предложены 2D - и 3D - имитационные модели процесса резания, предусматривающие определение формы стружки, границ отделения стружки от заготовки, границ контакта на поверхностях лезвия и других характеристик рабочего процесса на базе фундаментальных критериев и законов теории пластичности с применением метода конечных элементов (МКЭ) и учитывающие экспериментально найденные при испытаниях модели материалов: определяющие уравнения, трибологические свойства заготовки и инструмента и теплофизические константы [25].

Технологические системы импульсной обработки по сравнению с традиционными методами обладают рядом достоинств (высокая точность

деталей; упрощенная оснастка и подготовка производства; обработка труднодеформируемых материалов; малые габариты установок и т. д.) [26, 148].

Активно развиваются технологические процессы обработки металлов давлением (взрывная штамповка, непрерывная и бесконечная прокатка и т. д.). При обработке металлов давлением в настоящее время наибольшее распространение приобрели программы: DEFORM; QForm; SuperForge/SuperForm, FORGE Forming Suite.

Нелинейность процессов нестационарного деформирования сложных составных конструкций, необходимость создания достоверной цифровой модели прототипов неоднородных анизотропных материалов, внутренняя логика интеграции различных научных теорий обуславливают потребность в комплексном моделировании динамического нагружения многокомпонентных тел, создании новых и совершенствовании существующих методик расчета и оптимизации технологических процессов, используемых для обработки неоднородных материалов.

Классификация подходов к решению задач оптимизации многокомпонентных тел и технологических систем для обработки неоднородных материалов

В области оптимизации нагруженных конструкций отметим работы Н. А. Алфутова, Н. В. Баничука, С. И. Богомолова, В. В. Васильева, Э. И. Григолюка, П. А. Зиновьева, В. В. Кобелева, Я. Леллепа, С. А. Лурье, А. И. Муштари, В. П. Малкова, В. Л. Нарусберга, Ю. В. Немировского, И. Ф. Образцова, Ю. М. Почтмана, Р. Б. Рикардса, М. И. Рейтмана, Э. А. Симсона, И. М. Соболя, Р. Б. Статникова, Г. А. Тетерса, А. Г. Угодчикова, S. Adali, R. D. Adams, D. G. C. Bacon, A. S. Bisco, C. Chamis, T.-W. Chou, H. Eschenauer, Z. Gürdal, R. Haftka, W. Hufenbach, R. Jones, L. Kroll, M. Leibowitz, J. M. Lifshitz, S. Lukaszewicz, M. R. Maheri, C. Mota Soares, A. Muc, P. Pedersen, G. S. Springer, Z. Q. Xia, P. Zuchara.

Расширяющемуся внедрению методов оптимального проектирования способствовали следующие факторы:

быстрый рост вычислительных мощностей и аппаратно-программных решений (персональные компьютеры, ноутбуки, рабочие станции, вычислительные кластеры, планшеты, суперкомпьютеры (как на базе Windows, так и на основе UNIX и LINUX); методы работы с большими

массивами данных (Big Data); CAD/CAE/CAM программные комплексы и т. д.) [147];

развитие теоретических аспектов решения проблем оптимизации (топологической, параметрической, многокритериальной и т. д.) [51];

создание современных ультрапрецизионных и высокопроизводительных производственных технологий [10].

На рисунке 6 представлены схемой основные этапы истории развития оптимизации за рубежом в соответствии с работой [121].

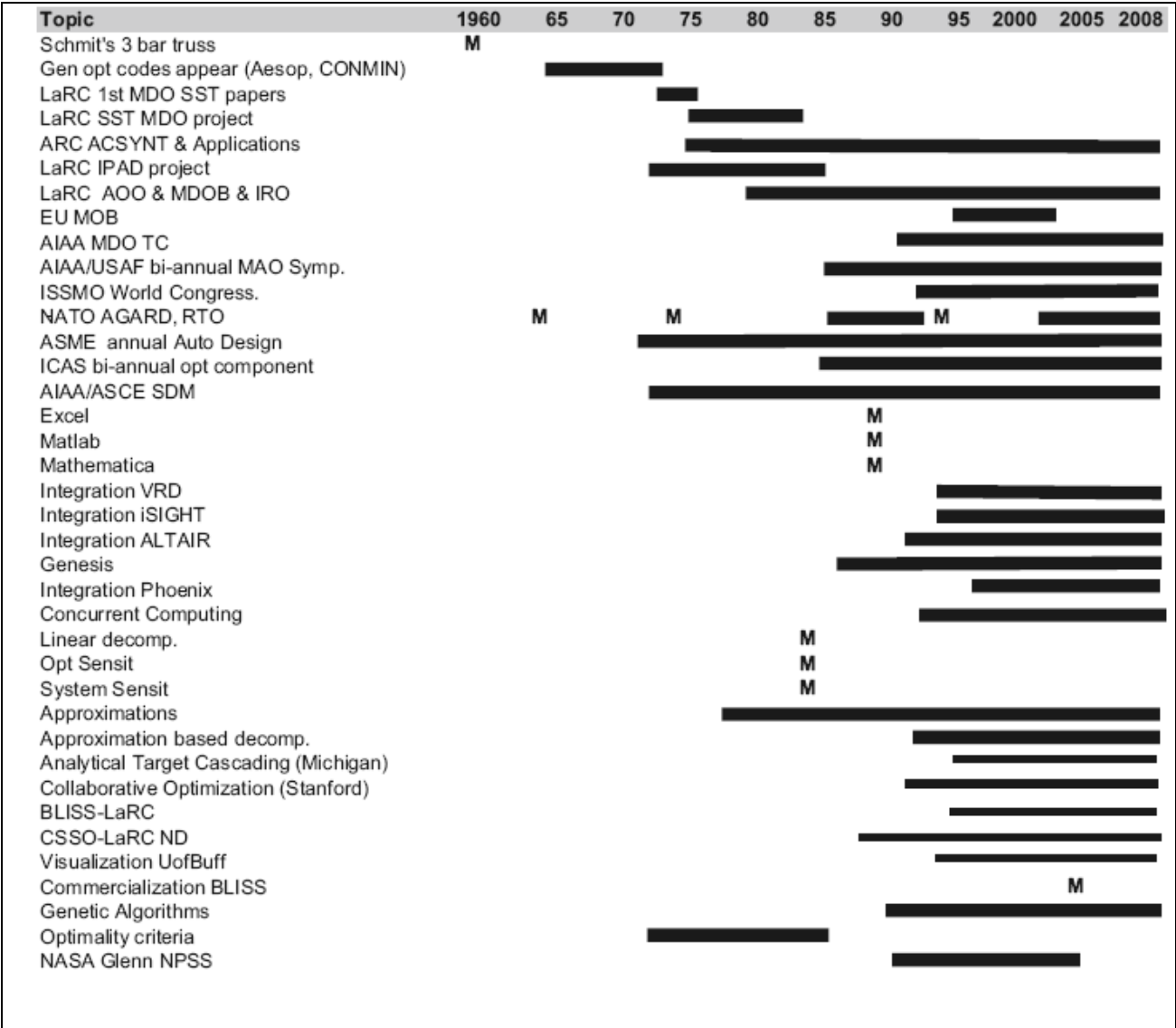


Рисунок 6 – Основные этапы развития оптимизации с 1960 по 2008 г. г. за рубежом на условной временной шкале ("М" обозначает вежу) в соответствии с работой [121].

Разработке фундаментальных основ оптимального проектирования объектов (материалов, изделий, конструкций, сооружений, технологических

систем) с неоднородной многоуровневой (MultiScale: нано - микро - мезо - макро) структурой посвящено значительное число работ, включая обширные монографии, труды конференций и т. п., которые обобщаются множеством обзоров.

Вследствие этого для списка литературы данного краткого обзора среди научных публикаций отобраны только ключевые на субъективный взгляд автора работы (в основном за последние 5 лет) [51, 52, 59, 70, 71, 74, 79, 86, 87, 90, 97, 98, 112, 114, 123, 130, 141, 142, 145, 149, 151-153, 157, 159, 163, 164].

Обобщая современное состояние вопросов оптимального проектирования как многокомпонентных конструкций, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов; можно констатировать следующее.

Большинство описанных в литературе постановок решенных задач оптимизации связано с проблемой предельного снижения веса или его аналогов при обеспечении статической прочности (несущей способности). Реже в качестве критерия цели используются функционалы динамических характеристик, собственные частоты, критические параметры устойчивости, характеристики флаттера и дивергенции, комплексные характеристики стоимости и надежности и т.д. [40, 125].

К основным показателям качества, как многокомпонентных тел, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов, относятся производительность, энергоемкость, максимальные напряжения, материалоемкость, надежность, долговечность, технологичность, удельная стоимость единицы продукции и т. д.

Нелинейная целевая функция, как многокомпонентных тел, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов является суперпозицией критериев качества, при этом в качестве весовой функции применяются неопределенные множители Лагранжа. Большинство исследований посвящено однокритериальным или сводящимся к ним задачам оптимизации конструкций [40, 125].

Наличие большого числа критериев качества приводит к противоречивым требованиям на этапе проектирования. В зависимости от типа требований, предъявляемых к оптимизируемому объекту, задачи подразделяются на два типа: скалярной и векторной оптимизации.

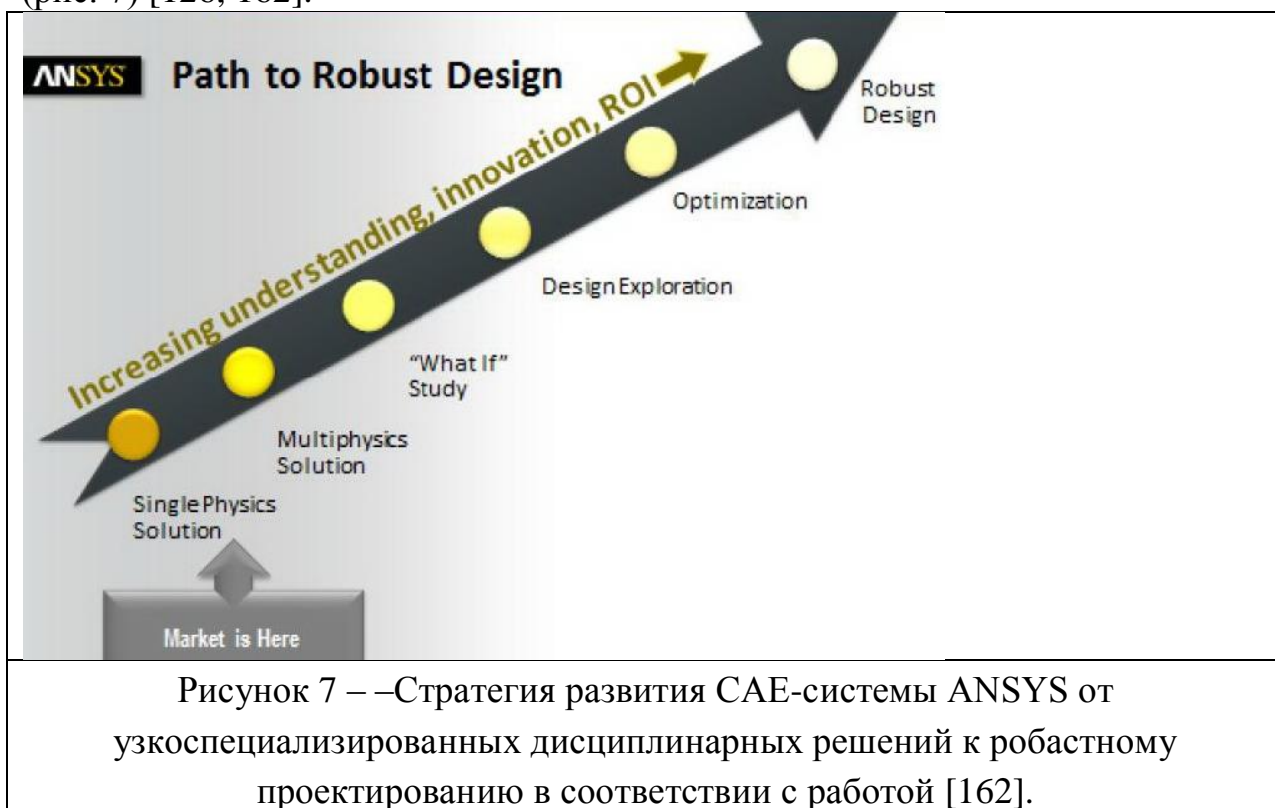
При рассмотрении многокритериальных задач наиболее распространенным является нахождение множества Парето компромиссных решений. Основные понятия и определения, возможные условия

оптимальности и особенности математического аппарата, связанные с оптимизацией по Парето, излагаются в трудах [98, 156].

Целью оптимального проектирования при этом является определение области компромиссов (или переговорного множества, или области Парето). Область компромиссов составляет множество потенциальных реализаций вектора варьируемых параметров, отличающихся тем, что по всем локальным критериям не может быть улучшено синхронно ни одно из относящихся к области решений. Выбор конкретного проекта в данном множестве вырабатывается экспертами.

Сложность и противоречивость критериев, большое число разнохарактерных конструктивных переменных, неформализуемость некоторых ограничений; различная точность, детерминированность и нелинейность моделей, требования унификации не позволяют решать математически строго задачу оптимизации параметров непосредственно для составных многоэлементных конструкций машин. Основной концепцией оптимального проектирования в подобных случаях является многоуровневый иерархический подход [40].

Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный класс объектов, может включать большое количество методов из различных областей с применением апробированных CAD/CAM/CAE-систем (рис. 7) [126, 162].



Ряд работ посвящен теоретическим вопросам оптимизации (существование, сингулярность, двойственность, сходимость, бимодальность, непрерывность и т.д.) [40, 125].

Классификация методов решения задач оптимизации нагруженных конструкций и технологических систем

Выбор эффективного метода решения задач оптимизации, как многокомпонентных тел, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов является завершающей ступенью исследования. Большая часть публикаций посвящена этой проблеме [7, 12, 40, 42, 43, 51, 52, 54, 59, 69-74, 79, 86, 87, 90, 91, 117, 118, 125, 132, 141-145].

Значительное число трудов описывает проектирование конкретных объектов и содержит сведения только об алгоритмах и результатах их проектирования. Наряду с этим расчетные схемы объектов оптимизации предельно упрощены - для них характерно малое число проектных переменных. При этом чаще всего рассматриваются модельные объекты (балки, пластинки, оболочки), а не реальные конструкции с характерной для практических задач проектирования сложностью моделей [40, 125].

При формулировке и решении задач оптимального проектирования, как многокомпонентных тел, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов применяются два ключевых подхода: дискретный и континуальный. Метод оптимизации и оптимальное решение во многом определяется выбором класса варьируемых параметров (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных переменных) [125].

Методы оптимизации можно классифицировать следующим образом: прямые; первого порядка; стохастические; второго порядка; линейного и нелинейного программирования. Среди прямых выделим методы: Гаусса; Нелдера — Мида; Хука — Дживса; конфигураций; Розенброка [129].

Методы первого порядка (градиентный спуск; Зойтендейка; покоординатный спуск; сопряжённых градиентов; квазиньютоновские; Левенберга — Марквардта, их модификации и многие другие) используют информацию о градиенте функционалов качества, как многокомпонентных тел, так и технологических систем для обработки неоднородных материалов [29, 33, 34, 38, 49, 50, 151]. В этих методах, базируясь на локальных свойствах функций, описывающих критерий качества и ограничения,

реализовывается численный поиск улучшающего направления. Проект в данном направлении модифицируется на подходящую величину шага.

В качестве универсального метода локальной оптимизации при решении практических задач, характеризующихся высокими размерностью вектора варьируемых параметров и числом функциональных ограничений, часто предпочтительным представляется метод последовательной линеаризации [35, 51, 125].

На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональных ограничений по варьируемым переменным; построение области линеаризации; решение задачи линейного программирования. Конструктивная форма условий оптимальности первого порядка на примере с функциональными ограничениями типа равенств имеет вид

$$\begin{aligned} \min & \delta \vec{h}^T \vec{\nabla}_h J_0 \\ & J_j + \delta \vec{h}^T \vec{\nabla}_h J_j = 0 \\ & \vec{h} + \delta \vec{h} \in \delta U \cap U \end{aligned}$$

Для практического решения задачи оптимизации область линеаризации формируется пересечением области δU , базирующейся на характере изменения (производных) целевой функции J_0 и функционалов - ограничений J_j , и допустимой области U в виде гиперпараллелепипеда:

$$h_i^- \leq h_i \leq h_i^+, \quad i = \overline{1, n}.$$

Область линеаризации должна удовлетворять целому ряду условий. Она должна быть достаточно малой, чтобы формулы первого порядка с приемлемой точностью описывали приращения функционалов, и в то же время достаточно большой, чтобы процесс оптимизации не был слишком медленным [40, 125].

Область должна быть построена так, чтобы она целиком содержалась в глобальной области геометрических ограничений, при этом должна быть обеспечена возможность изменения ее конфигурации по любому возможному направлению в n -мерном пространстве варьируемых параметров.

Среди технологий линейного программирования выделим: симплекс-метод; алгоритм Гомори; методы эллипсоидов и потенциалов. Реализация методов второго порядка (Ньютона; Ньютона — Рафсона; алгоритм Бroyдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS) и т.д.) связана как с трудностями вычисления второй производной критерия качества и функциональных ограничений, так и возможностью быстрой сходимости оптимизационного процесса [40, 125].

Следующий класс методов оптимизации приводит решение задачи к удовлетворению соответствующих условий оптимальности. При использовании непрямых методов (например, вариационного исчисления и теории оптимального управления) на каждой итерации проектирования удовлетворяются условия оптимальности без применения локальных свойств функционалов качества и ограничений.

Методы неприменимы при наличии ограничений типа неравенств и в случае негладких или разрывных варьируемых функций. Условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина функционируют с ограничениями типа неравенств. Кроме классической континуальной постановки разрабатывают дискретный принцип максимума для конечноэлементных моделей [35, 51, 125].

Среди популярных на Западе в области управления, исследования операций и промышленного проектирования технологий стохастического поиска отметим: метод Монте-Карло; «имитацию отжига»; генетические алгоритмы; «дифференциальную эволюцию»; «муравьиный» алгоритм; методы «роя частиц разума» и «искусственных иммунных систем».

Эволюционные технологии, реализующие случайный поиск с централизованным управлением и использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства, все чаще применяют в качестве метода глобальной нелинейной оптимизации [40, 125].

Оперируя совокупностью потенциальных решений, обрабатывается комплект параметров, структурированный в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с содействием генетических операторов отбора, кроссовера и мутации - *evolution, parameter setting, population initialization, individual selection, hybrid approach with conventional heuristics*.

При этом необходимо найти баланс между рекогносцировкой и разработкой пространства поиска, который зависит от характеристик различных проблем и должен изменяться динамически в зависимости от состояния процесса эволюции [7, 123, 127, 132-134, 154, 165].

Стратегия нахождения экстремума целевой функции в поисковом пространстве заключается в совместном использовании технологии оптимизации, осуществляющей случайный поиск параметров в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, эффективно стягивающего область параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров.

Электромеханический преобразователь ударного действия, функционирующий в импульсном режиме и характеризующийся увеличенной эффективностью работы и приемлемыми массогабаритными параметрами был создан на основе математической модели, учитывающей пространственно-временные поля многообразной природы (механические, электрические, магнитные и тепловые) с применением метода деформируемого многогранника и оптимизационных генетических алгоритмов [6, 7].

Метод «Teaching–Learning-Based Optimization (TLBO)» предложен в статье [134]. Он основан на эффекте влияния «учителя на учеников». Процесс разделяется на две части: первая заключается в «обучении с учителем», затем поиск идет за счет взаимодействия между «учащимися». Для проверки эффективности метода испытано пять различных контрольных тестовых функций с различными характеристиками и ограничениями, четыре разных тестовых механических задачи и шесть проблем оптимизации реальных конструкций. Эффективность метода сравнивалась с другими алгоритмами оптимизации по лучшему и среднему решениям, скорости сходимости и объему вычислительной работы.

Создание программного обеспечения многокомпонентных конструкций и технологических систем

Применение методики компьютерного проектирования “Simulation-Based Design” базируется на использовании многовариантного моделирования произвольных характеристик многокомпонентных конструкций и технологических систем во всевозможных условиях производства и эксплуатации. При использовании разных видов оптимизации SuperComputer Simulation and Optimization Based Design /Engineering (многомерной, структурной, топологической, параметрической, многокритериальной...) необходимо разрабатывать сложные «надстройки» обратных задач [35, 40, 51, 53, 69, 74, 77, 83, 106, 108, 117, 118, 157, 162].

При создании систем многокритериальной оптимизации (например, Isight; IOSO; Optimus, modeFRONTIER, OptiY, pSeven, XTREME, Nexus, optiSLang) описание постановок задач оптимального проектирования объекта, как правило, разрабатывают отдельно от его математической модели анализа (концепция «черного ящика») [126, 162]. Программы оптимизации в соответствии с реализованными в них алгоритмами на основе анализа функционалов качества и ограничений генерируют на каждой итерации варианты параметров проектирования и передают их в модели анализа.

Схема обмена данными между расчетными математическими моделями и программой оптимизации многокомпонентных конструкций и технологических систем для обработки неоднородных материалов может варьироваться. Для элементарных случаев с применением аналитической модели отдельные программы описывают ее прямо внутри благодаря встроенным редакторам и интерпретаторам скриптовых языков программирования: JavaScript, VBScript, Python и др. [69, 74, 77, 83, 106, 108, 117, 118].

Другой подход состоит в применении выходных и входных текстовых файлов. Эта технология более популярна, поэтому множество программ функционирует с текстовыми файлами.

Программа оптимизации на каждой итерации генерирует набор величин параметров проектирования, внося их во входной файл модели анализа (например, ABAQUS, ADAMS, ANSA, SolidWorks, ANSYS, PATRAN/NASTRAN, Creo, SAMCEF, STAR-CCF+). После окончания расчета значения переменных состояния и функционалов записываются в выходной файл модели анализа, являющейся исходной информацией для следующего этапа процесса оптимизации [69, 74, 77, 83, 106, 108, 117, 118].

Технология взаимодействия, организованная на применении высокоуровневых стандартизованных интерфейсов (Application Programming Interface), обеспечивает доступ снаружи к внутренним функциям, позволяя связать программу оптимизации с расчетной моделью без текстовых файлов. Данную схему именуют «Direct integration». В соответствии с концепциями программирования потоков данных и визуального программирования для описания процессов интеграции и оптимизации оперируют узлами (блоками) и связями между ними.

Программы класса PIDO-систем (Process Integration and Design Optimization) позволяют интегрировать разные расчетные модели комплексов CAD/CAM/CAE в единую вычислительную среду и автоматически в процессе оптимизации управлять ими [69, 74, 77, 83, 106, 108, 117, 118]. В

ряде систем для требующих больших вычислительных ресурсов моделей реализован потенциал распараллеливания расчетов с применением многообразных модификаций и комбинаций методов декомпозиции по стандартным сетевым протоколам с использованием в автоматическом режиме многопроцессорных систем, объединенных через Интернет.

Классификация подходов к решению задач оптимизации контактного взаимодействия подшипников качения

Методы нелинейного программирования стали основой решения многих контактных задач многокомпонентных тел. При этом дискретизация производится методами - конечных разностей, граничных элементов, конечных элементов. В зависимости от формы поверхности контакта напряжения могут иметь максимумы, сокращающие время существования компонент машин и ухудшающие характеристики технологических систем [127].

Одним из первых направлений оптимизации взаимодействия многокомпонентных тел являлась максимизация области контакта. Первоначально выбирались варианты начального геометрического без нагрузки контакта по участку поверхности. При этом даже при контакте идеально совпадающих (конгруэнтных) поверхностей появлялась проблема концентрации напряжений в области кромок.

Для ее ликвидации применялись разнообразные проектные варианты (например, бочкование роликоподшипников). Для деталей с точечной локализацией контакта с целью уменьшения контактных давлений существует ориентация на снижение приведенной кривизны.

В исследовании [85] была сделана одна из первых попыток путем оптимизации формы поверхности выравнивать контактные нагрузки с применением методов линейного программирования.

В работе [103] на базе линейного программирования и метода конечных элементов изучение данной проблемы получило дальнейшее развитие.

В исследованиях Cheng; Belegundu, Chand Tupatla; Clarke; Park; Anderson и др. изучение данной тематики было продолжено с использованием методов нелинейного программирования [129]

В работе [150] была предложена упрощенная итерационная процедура с целью сглаживания максимумов нагрузок при константном объеме тел контакта.

Оптимизация взаимодействия многокомпонентных тел обрела дальнейшее развитие с применением алгоритма ESO (evolutionary structural optimisation), пригодного для обширного класса задач оптимизации контакта и предложенного в работе [165].

Наиболее оптимальной работа сопряжения является в установившемся режиме процесса износа, потому что характеризуется в этом случае стабилизацией давления, являющегося управляющим параметром всех характеристик сопряжения. Поэтому задача оптимизации процесса износа поверхностей за счет приближения его начальных характеристик к стационарным ставится в исследовании [17].

Целевые функции предложены работе [95] для оптимизации поверхностей контакта.

Направление оптимизации взаимодействия многокомпонентных тел находится на этапе становления. Задачи оптимизации в основном носят модельный характер и рассматриваются для случаев простой геометрии (два контактирующих тела, пространственно двумерные статические задачи) и линейной изотропной упругости.

В работе [43] для оптимизации профиля боковой поверхности ролика и ответной поверхности колец первоначально создают параметрические геометрические и конечно-элементные модели, в которых образующая ролика и ответная поверхность имеют переменную кривизну (сплайны по N точкам). После этого по критерию минимума максимальных контактных напряжений оптимизировался профиль ролика при варьировании параметрами, всецело описывающими геометрию его образующей. Локальные минимумы были получены на основе программного комплекса ANSYS.

В конфигурации оптимальной поверхности отчетливо прослеживался «логарифмический» (к краям кривизна увеличивается от центра) характер образующей ролика. При росте нагрузке на него увеличивается и «бочкообразность».

При решении задачи оптимизации в работе [43] был получен профиль, при котором на кромках снимается концентрация; распределение напряжений становится более равномерным, при этом максимальные контактные уменьшаются на 40-50%.

В работе [42] проанализированы проблемы решения контактных задач и оптимизации для трибологической пары образующая ролика - дорожка качения для буксовых узлов железнодорожных вагонов и локомотивов.

Максимизация зоны контакта, не желательная при существовании трения, является сопутствующим последствием минимизации максимальных контактных напряжений. Уменьшение энергии, затрачиваемой на трение в подшипниковых узлах качения в зоне контакта, приводит к снижению износа конструкции, а, следовательно, и повышению ресурса.

В исследовании [42] в качестве критерия оптимизации используется интеграл интенсивности работы силы трения по высоте внутренней поверхности борта кольца

$$G = \int A^i_{tp} dh$$

При минимизации интенсивности работы сил трения оптимальный угол наклона боковой поверхности ролика и ответной поверхности колец был меньше заданного по ГОСТ. Интенсивность максимальных напряжений константно увеличивалась при повышении угла [42].

В исследовании [54] для ряда моделей бортика и торца решались задачи оптимизации при варьировании размерами кривизн профильной фаски на торце ролика и внутренней поверхности борта кольца, скоса и угла конусности; высоты точки касания. Переход к более сложным оптимальным поверхностям снизил максимальные контактное напряжение и интенсивность работы сил трения, что увеличило срок службы и уменьшило материалоемкость.

В работе [91] проведен динамический анализ на основе метода конечных элементов (FEM) и оптимизация шпиндельных узлов для механической обработки на опорах качения.

В исследовании [154] рассматривается оптимальное проектирование цилиндрических роликовых подшипников с применением эволюционных алгоритмов.

В статьях [155, 156] на основе подхода Парето рассматриваются две целевые функции (динамическая радиальная нагрузка подшипника и минимальная толщина упругогидродинамической пленки между роликами и дорожками качения). Оптимизация однорядных цилиндрических роликовых подшипников проводилась с содействием многоцелевых эволюционных алгоритмов. Для описания геометрии подшипника в качестве варьируемых переменных использовались диаметр ролика, комплексный коэффициент, длина ролика.

Нелинейный метод оптимизации на основе генетических алгоритмов был разработан для проектирования подшипников качения. Целевой

функцией является максимум усталостной долговечности. Кинематические ограничения неявным образом сужают область варьирования [133].

Генетические и гибридные алгоритмы оптимизации, такие как ABC, PSO, DE, BBO и AIA, используются для оптимального проектирования механических элементов, в т. ч. радиальных подшипников. В работе [134] представлено сравнение производительности алгоритмов оптимизации.

В исследованиях [12, 13] отмечается, что существенный резерв усовершенствования работы торцевого контакта составляющих состоит в совершенствовании противозадирных и антифрикционных свойств смазки при использовании современных геомодификаторов трения; в снижении коэффициента динамичности при повышении податливости бортов колец.

В работе [56] рассматривается наиболее опасный по последствиям для сепаратора вариант заклинивания ролика о борт кольца. При решении задачи оптимизации сепаратора подшипника TBU 150x250 были найдены оптимальные параметры конфигурации, при которых максимальные интенсивности напряжений снижались на 20 %, что значительно уменьшало вероятность повреждения сепаратора и преждевременной замены подшипникового узла.

В исследованиях [13, 54] отмечается, что оптимальные параметры формы поверхностей компонентов торцевого контакта зависят от условий эксплуатации и времени наработки подшипникового узла. Проектные параметры подшипника после численной оптимизации потенциально станут неоптимальными из-за деформации компонентов после его изготовления, монтажа в узел и эксплуатации. Для подшипников оптимальные параметры предлагается находить анализом износа подшипников, изъятых из эксплуатации.

Выводы

Нелинейность процессов нестационарного деформирования сложных составных конструкций, необходимость создания достоверной цифровой модели прототипов неоднородных анизотропных материалов, внутренняя логика интеграции различных научных теорий обуславливают потребность в комплексном моделировании динамического нагружения многокомпонентных тел, создании новых и совершенствовании существующих методик расчета и оптимизации технологических процессов, используемых для обработки неоднородных материалов.

Анализ показал, что актуальной и важной научно-практической задачей является исследование потенциала применения методов анализа чувствительности сложных конечноэлементных моделей и современных методов оптимизации при проектировании многокомпонентных тел, подвергающихся нагружению, и выборе рациональных параметров технологических процессов обработки неоднородных материалов. Так как процесс разрушения согласно экспериментальным данным носит вероятностный характер, определенный интерес при исследовании случайного распределения физико-механических характеристик материалов представляет анализ чувствительности.

Все используемые подходы, модели и методы оптимизации многокомпонентных тел и технологических систем имеют свои области применения, характеризуются различными требованиями к ресурсам и уровню точности. В процессе исследований целесообразно использовать в качестве базы различные методы из некоторого доступного их множества (или их сочетание).

Решение задачи оптимизации подшипников качения непосредственно связано с решением ряда проблем:

- разработка специфических соотношений анализа чувствительности и условий оптимальности для конечноэлементных моделей конструкций с поворотной симметрией и со стохастическими ее нарушениями;

- оценка влияния погрешностей формообразования и изменения состояния материалов при изготовлении и эксплуатации подшипниковых узлов качения, нарушающих циклическую симметрию конструкций, на повышение динамической нагруженности (перегрузку) в предельной и статистической постановках;

- поиск распределения давлений на площадке контакта, кинетика трансформации изношенной поверхности, длительность ступени приработки с интенсивным изменением макрогеометрии контакта, взаимное положение контактирующих компонент при многообразных условиях нагружения;

- выбор антифрикционных препаратов, структурное и параметрическое управление эксплуатационными свойствами смазки (реологическая модель среды; зависимость вязкости, теплоемкости, плотности, теплопроводности смазки от давления и температуры; физические свойства контактирующих тел; топография поверхностей);

- нахождение участков проскальзывания и сцепления в контактных задачах с трением;

обобщенные данные о технологической наследственности, связанной с учетом прогрессивного накопления погрешностей; появляющимися на различных стадиях производства всех составных частей подшипниковых узлов качения.

В связи с отмеченными обстоятельствами необходимо совершенствование численных методов расчета колебаний подшипниковых узлов качения; определения зависимости вибрации от основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов; разработка требований к основным параметрам для обеспечения заданного уровня вибрации при проектировании.

Список литературы

1. Александров В. М. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. / В. М. Александров, М. И. Чебаков / – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
2. Александров В. М. Контактная задача с учетом износа, вызванного локальным оплавлением / В. М. Александров // Физико-химическая механика материалов. –1986. –№ 1. – С. 116- 124.
3. Александров В. М. Осесимметричная контактная задача об износе оплавлением / В. М. Александров // Изв. АН СССР. МТТ. — 1990. — № 6. — С. 36- 42.
4. Андреев А. Г. Основные работы ученых ХПИ в области анализа термонапряженных конструкций / А. Г. Андреев, С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харьков : НТУ «ХПИ». — 2013. — № 63 (1036) : Динамика и прочность машин. — С. 3–11.
5. Бобырев С. В. Компьютерно- графическое моделирование в технологической подготовке производства конических роликов / С. В. Бобырев, А. П. Гонтарев, В. В. Погораздов // Исследование сложных технологических систем: межвуз. науч. сб. — Саратов: СГТУ. — 2008. — С. 15-25.
6. Болюх В. Ф. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя / В. Ф. Болюх, С. А. Назаренко, М. А. Рассоха / Інтегровані технології та енергозбереження. — 2009. — № 3. — С. 34–40.
7. Болюх В. Ф. Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия / В.

Ф. Болух, С. А. Назаренко / Интегрировані технології та енергозбереження. — 2010. — № 2. — С. 36–43.

8. Бородин А. В. Повышение ресурса цилиндрических подшипников буксы грузового вагона : моногр. / А. В. Бородин, Ю. А. Иванова / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2011. — 102 с.

9. Буйносов А.П. Теоретическое обоснование и основные принципы построения компьютерной модели экипажной части промышленного электровоза / А. П. Буйносов, И. В. Умылин // Новая наука: От идеи к результату. — 2016. — № 1 - 2 (60). — С. 132 - 138.

10. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / научный редактор К. В. Дорофеев, руководитель группы В. Н. Княгинин. — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. — 110 с.

11. Гайдамака А.В. Випробування на знос деталей роликотішипників важких режимів експлуатації. 3. Підвищення зносостійкості / А.В. Гайдамака // Проблеми трибології. — 2011. — № 3. — С. 52–59.

12. Гайдамака А. В. Оптимізація числа мастилоутримуючих канавок поверхонь тертя склополіамідного сепаратора з базуючим кільцем роликотішипників типу 2726 / А. В. Гайдамака, В. Ю. Алефіренко, М. Г. Ревлюк // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. — Харків, 2010. — Вип. 114. — С. 70–74.

13. Гайдамака А. В. Роликотішипники букс вагонів і локомотивів: моделювання і удосконалення : монографія / А. В. Гайдамака. — Х. : Изд-во «Курсор», 2011. — 320 с.

14. Горшков А. Г. Динамические контактные задачи с подвижными границами : монография / А. Г. Горшков, Д. В. Тарлаковский. — М.: Наука. — 1995. — 351 с.

15. Горячева И. Г. Контактное взаимодействие упругих тел с тонкими вязкоупругими покрытиями в условиях трения качения или скольжения / И. Г. Горячева, А. П. Горячев, Ф. Садеги // ПММ. — 1995. — Т. 59. — Вып. 4. — С. 634-641.

16. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия : монография / И. Г. Горячева. — М.: Наука. — 2001. — 479 с..

17. Горячева И. Г. Управление формоизменением поверхностей при изнашивании / И. Г. Горячева, О. Г. Чекина // Трение и износ. — 1989. — Т. 10. — № 1. — С. 5-12.

18. Зверев И. А. Комплексное моделирование при проектировании шпиндельных узлов на опорах качения / И. А. Зверев, Ю. М. Данильченко //

Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — 2014. — Вип. 150. — С. 75-80.

19. Зеленцов В. Б. Об одном асимптотическом методе решения нестационарных динамических контактных задач / В. Б. Зеленцов // ПММ. — 1999. — Т. 63. — Вып. 2. — С. 317-326.

20. Колесников Ю. В. Механика контактного разрушения : монография / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. — М.: Наука. — 1988. — 224 с.

21. Контактное трение в процессах обработки давлением : монография / А. Н. Леванов [и др.]. — М.: Металлургия, 1976.— 416 с.

22. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред: монография. / С. М. Айзикович [и др.]. — М.: Физматлит. — 2006. — 237 с.

23. Коровчинский М. В. Локальный контакт упругих тел при изнашивании их поверхностей / М. В. Коровчинский // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. — М.: Наука. — 1971. — С. 130-140.

24. Коровчинский М. В. Осесимметричный термоупругий контакт при тепловыделении от трения / М. В. Коровчинский // Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. — М.: Наука. — 1978. — С. 68-92.

25. Криворучко Д. В. Исследование влияния параметров модели трения на распределение контактных напряжений, силы и температуры резания при механической обработке сталей / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, О. А. Залога // Вісник НТУУ «КПІ»: Серія «Машинобудування». — 2009. — №57. — С. 132-138.

26. Кривцов В. С. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов / В. С. Кривцов, В. К. Борисевич / Авиационно-космическая техника и технология. — 2007. — №11(47). — С.10-17.

27. Кубенко В. Д. Ударное взаимодействие тел со средой. (Обзор) / В. Д. Кубенко // Прикл. мех. — 1997. — Т. 33. — № 12. — С. 3-29.

28. Кудиш И. П. Колебания деформируемого цилиндра при его качении по жесткому полупространству со смазкой / И. П. Кудиш, М. Я. Пановко // Трение и износ. — 1992. — Т. 13. — № 5. — С. 765-776.

29. Лавинский В. И. Анализ чувствительности характеристик прочности и жесткости структурно связанных систем / В. И. Лавинский, С. А. Назаренко, Ю. П. Анацкий // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч.

тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. — № 38 : Динамика и прочность машин. — С. 77–82.

30. Марусенко С. І. Аналіз статико–динамічних нелінійних процесів у елементах структурно зв'язаних систем / С. І. Марусенко, С. О. Назаренко, Е. А. Сімсон // 3б. наук. пр. Академії внутрішніх військ МВС України. — 2010. — № 1 (15). — С. 65–75.

31. Мигаль В.Д. Техническая диагностика автомобилей: Справочное пособие в 6 томах. Том 1. Дефекты производства и эксплуатационные неисправности / В.Д. Мигаль, В.П. Мигаль. — 2-е изд. стер. — М.: Изд-во ИПЦ Маска, 2013. — 350 с.

32. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения : монография / Е. М. Морозов, М. В. Зернин. — М.: Машиностроение. — 1998. — 544 с.

33. Назаренко С. А. Анализ чувствительности конечномерных и континуальных моделей структурно связанных систем / С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — 2007. — № 22: Динамика и прочность машин. — С. 127.

34. Назаренко С. А. Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы / С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — 2006: Динамика и прочность машин. — № 32. — С. 119–122.

35. Назаренко С. А. Компьютерное моделирование мультифизических процессов в нагруженных конструкциях и технологических системах [Электронный ресурс] / С. А. Назаренко. — Электронный репозиторий Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». — Электрон. текстовые данные. — Харьков, 2016. — 63 с.

36. Назаренко С. А. Математические модели мультифизичного анализа конструкций для CALS технологий / С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харків : НТУ «ХП», 2008. — № 47 : Динамика и прочность машин. — С. 125–132.

37. Назаренко С. А. Математические модели элементов машин при воздействии физических полей и внешней среды / С. А. Назаренко, Э. А. Симсон // Механіка та машинобудування. — 2009. — № 1. — С. 69–77.

38. Назаренко С. А. Многодисциплинарный анализ чувствительности для исследования жизненного цикла изделия / С. А. Назаренко // Физические

и компьютерные технологии : тр. 11-й Междунар. научно-технической конф. — Харьков, 2005. — С. 29–34.

39. Назаренко С. А. Некоторые задачи высокоскоростного нагружения элементов конструкций / С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. — № 63 (1036) : Динамика и прочность машин. — С. 102–107.

40. Назаренко С. А. Разработка технологии оптимизации нагруженных многокомпонентных конструкций и технологических систем [Электронный ресурс] / С. А. Назаренко. — Электронный репозиторий Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». — Электрон. текстовые данные. — Харьков, 2016. — 36 с. — Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/22751>.

41. Нерубай М. С. Физико-технологические методы обработки и сборки : монография / М. С. Нерубай, В. В. Калашников, Б. Л. Штриков, С. И. Ярьсько. — М.: Машиностроение. — 2005. — № 1. — 396 с.

42. Оптимизация бортов колец и торцевой поверхности ролика подшипника качения / Ю. П. Анацкий [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. — Харків: НТУ «ХП». — 2009. — № 42. — С. 8-11.

43. Оптимизация образующей поверхности ролика подшипника качения / Ю. П. Анацкий [и др.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. — Харків: НТУ «ХП». — 2009. — № 30. — С. 8-11

44. Пини В. Е. Трение в цилиндрических роликоподшипниках / В. Е. Пини // Вестник машиностроения. — 2008. — № 1. — С. 3–6.

45. Подшипниковые узлы современных машин и приборов : энциклопед. справ / под общ. ред. В. Б. Носова. — М. : Машиностроение, 1997. — 640 с.

46. Поручиков В. Б. Методы динамической теории упругости: монография / В. Б. Поручиков. — М.: Наука, 1986. — 328 с.

47. Проников А. С. Макротрибология и ее задачи / А. С. Проников // Трение и износ. 1998.— Т. 19. — № 2. — С. 155-164.

48. Силаев Б. М. Трибология деталей машин в маловязких смазочных средах : монография / Б. М. Силаев. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. — 264 с.

49. Симсон Э. А. Анализ чувствительности для конечноэлементных моделей конструкций / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, В. Б. Любецкая // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харьков : НТУ «ХПИ». — 2003. — № 8. — т. 3 : Динамика и прочность машин. — С. 77–82.

50. Симсон Э. А. Анализ чувствительности при комбинированном статико-динамическом нагружении конструкций / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, В. Б. Любецкая // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2003. — № 12. — т. 1 : Динамика и прочность машин. — С. 125–129.

51. Симсон Э. А. Оптимизация в проектировании: теории и приложения / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко // Инфиз: очерки истории творчества. — Харьков : ЭнергоКлуб Украины, 2005. — С. 329–345.

52. Симсон Э. А. Оптимизация элементов конструкций по прочностным и динамическим характеристикам / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, Ю. П. Анацкий // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2004. — № 31 : Динамика и прочность машин. — С. 137–140.

53. Симсон Э. А. Методика анализа чувствительности вибрационных параметров механических систем / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, М. В. Трохман // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 2/4. — С. 44–47.

54. Симсон Э. А. Поиск критерия оптимизации торцевой поверхности ролика и внутренней поверхности бортов колец подшипника качения / Э. А. Симсон, В. В. Овчаренко, Ю. А. Шевчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. — Харків: НТУ «ХПІ». — — 2010. — № 69. — с. 117-121

55. Симсон Э.А. Проблемы мультидисциплинарной оптимизации элементов конструкций. CFD-анализ / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, С. И. Марусенко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2004. — № 47 : Динамика и прочность машин. — С. 19–22.

56. Симсон Э. А. Расчет напряженно-деформированного состояния сепаратора подшипника качения / Э. А. Симсон, В. В. Овчаренко, Ю. А. Шевчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний

выпуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – Вип. 37. – С. 142–145.

57. Симсон Э. А. Холодная раскатка заготовок подшипниковых колец / Э. А. Симсон, В. В. Овчаренко, В. И. Демидов, С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2011. — № 52 : Динамика и прочность машин. — С. 156–160.

58. Солдатенков И. А. Решение контактной задачи для композиции полоса- полуплоскость при наличии изнашивания с изменяющейся областью контакта / И. А. Солдатенков // Изв. РАН. МТТ. — 1998. — № 2. — С. 78-88.

59. Степанов М. С. Разработка метода многодисциплинарной оптимизации механико–технологических систем / М. С. Степанов, С. А. Назаренко, Н. С. Скворцов // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». — Харьков : НТУ «ХПИ». — 2010. — № 24. — С. 32–40.

60. Тимофеев Ю. В. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий / Ю. В. Тимофеев, В. А. Фадеев, М. С. Степанов, С. А. Назаренко // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. : темат. вып. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т».. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2009. — № 1 : Технологии в машиностроении. — С. 86–95.

61. Ткачук Н. Н. Контакт сложнопрофильных тел: связанная задача анализа напряженно-деформированного состояния и геометрического синтеза / Н. Н. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, Н. А. Ткачук // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Транспортное машиностроение. — Харьков : НТУ "ХПИ". — 2014. — № 14 (1057). — С. 155-169.

62. Ткачук Н. Н. Модели и разрешающие соотношения для анализа контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов / Н. Н. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, А. В. Ткачук, В. И. Головченко / Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. — Х.: НТУ "ХПІ".— 2014. — № 29 (1072). — С.158-171.

63. Фёдоров С. В. Обобщенная энергетическая интерпретация экспериментальной зависимости коэффициента трения / С. В. Фёдоров // Трение и смазка в машинах и механизмах. Научно-технический журнал. — Изд. Машиностроение, 2006, — № 11. — С. 3–10.

64. Черменский О.Н. Подшипники качения: Справочник - каталог. / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. — М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.

65. Шупиков А. Н. Расчет напряжений циклически-симметричных

пространственных конструкций / А. Н. Шупиков, С. Ю. Мисюра // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 63 (1036). – С. 139-147.

66. A computational library for multiscale modeling of material failure / Talebi H. [et al.] // Computational Mechanics. – 2014. – Vol. 53. – №. 5. – P. 1047-1071.

67. Alexandrov K. Contact interaction of deformed coverings of solids with regard for wear and friction heating / K. Alexandrov, V. Gavdzinski // Proc. of the Second Intern. Symp. on Thermal Stresses and Related Topics. — New York, Rochester, 1997. — P. 371-373.

68. Alexandrov V. M. Asymptotic Methods in Contact Mechanics / V. M. Alexandrov // Math. Comput. Modelling. — 1998. — Vol. 28. — № 4-8. — P. 29-36.

69. Allaire G. A review of adjoint methods for sensitivity analysis, uncertainty quantification and optimization in numerical codes / G. Allaire // Ingénieurs de l'Automobile. – 2015. – Vol. 836. – P. 33-36.

70. Allison J. T. Multidisciplinary Design Optimization of Dynamic Engineering Systems / J. T. Allison, D. R. Herber // AIAA Journal. – 2014. – Vol. 52. – № 4. – P. 691-710. DOI: 10.2514/1.J052182.

71. Alonso J. J. Multidisciplinary Optimization with Applications to Sonic-Boom Minimization / J. J. Alonso, M. R. Colonno // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2012. – Vol. 44. – № 1. – P. 505–526.

72. Andreev A. G. Main achievements of scientists of NTU «KhPI» in the field of mechanics/ A. G. Andreev, S. A. Nazarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 57 (1166). – P. 3-7. doi: 10.20998/2078-9130.2015.57.72567.

73. Andreev A. G. Main results of scientific and pedagogical activity of professors of mechanics and control systems of NTU «KHPI» / A. G. Andreev, S. A. Nazarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 57 (1099). – P. 3-14. doi: 10.20998/2078-9130.2014.57.49378.

74. An Overview of the Optimized Integrated Multidisciplinary Systems Program / R. A. Reuter [et al.] // AIAA Science and Technology Forum and Exposition. – 2016. – P. 1-11.

75. Analysis of bearing stiffness variations, contact forces and vibrations in radially loaded double row rolling element bearings with raceway defects / D. Petersen [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2015. – Vol. 50. – P. 139 -160.

76. A Study of the Dynamics of the Rolling Element and its Effect on Outer Race Creep. / S. Alhasia [et al.] // SAE Technical Paper, 2016. – № 2016-01-0011.
77. A survey of open source multiphysics frameworks in engineering / Ö. Babur [et al.] // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 51. – P. 1088-1097
78. Ben-Dor G. Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics—a Review / G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. E. Iperin // Applied Mechanics Reviews. - November 2005. - Vol. 58. – P. 355-371.
79. Bahmani S. Greedy sparsity-constrained optimization / S. Bahmani, B. Raj, P. T. Boufounos // Journal of Machine Learning Research. – 2013 – № 14. – P. 807–841.
80. Bogomolov S. I. Application of a superparametric finite shell element to the calculation of turbine blade vibrations / S. I. Bogomolov, S. S. Lutsenko, S. A. Nazarenko // Strength of Materials. — 1982. — Vol. 14. — № 6. — P. 796–799. doi:10.1007/BF00769780.
81. Bragov A. M. Tension and compression behaviour of pre-stressed steel strands at high strain rate / A. M. Bragov, E. Cadoni, A. Konstantinov, A. Lomunov // Applied Mechanics and Materials. — 2011. - Vol. 82. — P. 154–159.
82. Chekina O. G. Wear-contact problems and modeling of chemical mechanical polishing / O. G. Chekina, L. M. Keer // J. of the electrochemical society. — 1998. — Vol. 145. — № 6. — P. 2100-2106.
83. Choi W. Comparison study of some commercial structural optimization software systems / W. Choi, J. Kim, G. J. Park // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2016. – P. 1-15.
84. Ciavarella M. On the elastic contact of rough surfaces: Numerical experiments and comparisons with recent theories / M. Ciavarella, C. Murolo, G. Demelio // Wear. – 2006. — Vol. 261. — P. 1102-1113.
85. Conry T. F. A Mathematical Programming Method for Design of Elastic Bodies in Contact / T. F. Conry, A. A. Seireg // ASME Trans. J. Appl. Mech. — 1971. — P. 387 -392.
86. Deaton J. D. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000 / J. D. Deaton, R. V. Grandhi // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2014. – Vol. 49. – № 1. – P. 1-38. DOI 10.1007/s00158-013-0956-z.

87. Deng S. Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity / S. Deng, K. Suresh // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2015. – Vol. 51. – № 5. – P. 987-1001.

88. DIN ISO 281/ A 2 (09.2001) "Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальная долговечность. Изменение 2. Коэффициент долговечности».

89. DIN 51519 (08.1998) "Материалы смазочные жидкие промышленные. Классификация вязкости по ISO "

90. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers / S. Boyd [et al.] // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2011. – № 3(1). – P. 1-122.

91. Gagnol V. Dynamic Analyses and Design Optimization of High-Speed Spindle-Bearing System / V. Gagnol // Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. – 2007. – P. 505-518.

92. Dynamic modeling and vibration response simulation for high speed rolling ball bearings with localized surface defects in raceways / Niu L. [et al.] // Journal of Manufacturing Science and Engineering—Transactions of the ASME. – 2014. – Vol. 136. – № 4. – Article ID 041015.

93. Dynamic modelling for vibration analysis of a cylindrical roller bearing due to localized defects on raceways / Wang F. [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. – 2015. – Vol. 229. – № 1. – P. 39-64.

94. Eplattenier P. Introduction of an Electromagnetism Module in LS - DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations / P. Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft // ICHSF 2006, Dortmund, Germany. – 2006. – P. 85–97.

95. Fancello E. A. Numerical Comparison Between Two Cost Functions in Contact Shape Optimization / E. A. Fancello, J. Haslinger, R. A. Feijoo // Structural Optimization. – 1995. – Vol. 9. – № 1. – P. 57-68.

96. Field J. E. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies / J. E. Field [et al.] // International Journal of Impact Engineering. – 2004. – № 30. – P. 725-775.

97. Flager F. Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building / F Flager [et al.] // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). – 2009. – Vol. 14. – P. 595 – 612.

98. Frischknecht B. D. Pareto Set Analysis: Local Measures of Objective Coupling in Multiobjective Design Optimization / B. D. Frischknecht, D. L. Peters,

P. Y. Papalambros // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2011. – Vol. 43. – № 5. – P. 617–630. doi :10.1007/s00158-010-0599-2.

99. Geiser J. Recent Advances in Splitting Methods for Multiphysics and Multiscale: Theory and Applications / J. Geiser // Journal of Algorithms & Computational Technology. – 2015. – Vol. 9. – № 1. – P. 65-93.

100. Goryacheva I. G. Contact Mechanics in Tribology / I. G. Goryacheva. – Dordrecht-Boston-London.: Kluwer Academic Publishers. – 1998. – 360 p.

101. Graney B. P. Rolling element bearing analysis / B. P. Graney, K. Starry // Materials Evaluation. – 2011. – № 70 (1). – P. 78–85.

102. Guo Y. Stiffness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model / Y. Guo, R. G. Parker // Mechanism and Machine Theory. – 2012 – № 51. – P. 32–45.

103. Haug E. J. Contact Stress Minimization by Contour Design / E. J. Haug, B. M. Kwak // Int. J. Numer. Meth. Engng. – 1978. – Vol. 12. – P. 917-930.

104. He Y. A scaled boundary finite element method for cyclically symmetric two-dimensional elastic analysis / Y. He // Computers and Structures. — 2013. – № 120. – P. 1–8.

105. Hou G. Numerical methods for fluid-structure interaction—a review / G. Hou, J. Wang, A. Layton // Communications in Computational Physics. – 2012. – Vol. 12. – № 2. – P. 337-377.

106. Groen D. Survey of multiscale and multiphysics applications and communities / D. Groen, S. J. Zasada, P. V. Coveney // Computing in Science & Engineering. – 2014. – Vol. 16. – № 2. – P. 34-43.

107. Harris T. Rolling bearing analysis / T. Harris. –New York : Wiley, 2006. – 760 p.

108. Hernandez N. V. Computer-Based Design Synthesis Research: An Overview / N. V. Hernandez, K. L. Wood // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2011. – Vol. 11. – № 2. – P. 021003-1–021003-10. doi:10.1115/1.3593409

109. Johnson K. L. Contact mechanics / K. L. Johnson. – Cambridge university press, 1985. – 452 p.

110. Keyes D. E. Multiphysics simulations: Challenges and opportunities / D.E. Keyes [et al.] // International Journal of High Performance Computing Applications. – 2013. – Vol. 27. – № 1. – P. 4-83.

111. Kouroussis G. Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects / G. Kouroussis, D. P. Connolly, O. Verlinden // International Journal of Rail Transportation. – 2014. – Vol. 2. – № 2. – P. 69-110.

112. Lambe A. B. Extensions to the Design Structure Matrix for the Description of Multidisciplinary Design, Analysis and Optimization Processes / A. B. Lambe, J. R. R. A. Martins // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2012. – Vol. 46. – P. 273–284. doi:10.1007/s00158-012-0763-y.

113. Lawn B. R. Indentation fracture: principles and application / B. R. Lawn, T. R. Wilshaw // J. Mater. Sci. – 1975. – Vol. 10. – № 6. – P. 1049–1081.

114. Level-set methods for structural topology optimization: a review / N. P. van Dijk [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48. – № 3. – P. 437–472. doi:10.1007/s00158-013-0912-y.

115. Lee C. Y. A-posteriori error estimation of hp finite -element approximations of frictional contact problems / C. Y. Lee, J. T. Oden // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. – 1994.– Vol. 113.– P. 11–45.

116. Li J. A semi-analytical approach to three-dimensional normal contact problems with friction / J. Li, E. J. Berger // Computational Mechanics. – 2003. – Vol. 30. – P. 310–322.

117. Martins J. R. R. A. Multidisciplinary design optimization: a survey of architectures / J. R. R. A. Martins, A. B. Lambe // AIAA journal. – 2013. – Vol. 51. – № 9. – P. 2049–2075. doi: 10.2514/1.J051895.

118. Martins J. R. R. A. Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models / J. R. R. A. Martins, J. T. Hwang // AIAA journal. – 2013. – Vol. 51. – № 11. – P. 2582–2599. doi:10.2514/1.J052184.

119. Zivkovic A. Mathematical modeling and experimental testing of high-speed spindle behavior / A. Zivkovic [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – March 2015. – Vol. 77. – № 5–8. – P. 1071–1086.

120. McDevitt T. W. A mortar-finite element formulation for frictional contact problems / T. W. McDevitt, T. A. Laursen // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2000. – Vol. 48. – P. 1525–1547.

121. MDO: Assessment and Direction for Advancement - An Opinion of One International Group / J. Agate [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010. – № 40 (1). – P. 17–33. doi:10.1007/s00158-009-0381-5.

122. Meyer L.W. Material behavior under dynamic mono- and biaxial loading / L. W. Meyer, N. Herzig, F. Pursche, S. Abdel-Malek // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering, 2010. — Warsaw, Poland, 2010. — P. 472.

123. Munk D. J. Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review / D. J. Munk; G. A. Vio; G. P. Steven // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2015. – Vol. 52. – № 3. – P. 613-631.

124. Nazarenko S. A. Main achievements of scientists of NTU «KHPI» in the field of mathematical modeling in engineering / S. A. Nazarenko, S. I. Marusenko // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – № 18 (1127). – P. 14-19.

125. Nazarenko S. A. Most important phases of development optimization of complex structure / S. A. Nazarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 57 (1166). – P. 87-90. doi: 10.20998/2078-9130.2015.57.72583.

126. NX Nastran Design Sensivity and Optimization Users Guide. – 2011.

127. Optimum Design of Rolling Element Bearing / S. Panda [et al.] // International Conference on Swarm, Evolutionary and Memetic Computing. – Springer International Publishing, 2014. – P. 156-163.

128. Padovan J. Modeling wear at intermittently slipping high speed interfaces / J. Padovan, P. Padovan // Computers and Structures. – 1994. – Vol. 52. – P. 795-812.

129. Park J. Geometric Optimization in Presence of Contact Singularities / J. Park, W. J. Anderson // AIAA Journal. – 1995. – Vol. 33. – № 8. – P. 1503-1509.

130. Piperni P. Development of a multilevel multidisciplinary-optimization capability for an industrial environment / P. Piperni, A. DeBlois, R. Henderson // AIAA journal. – 2013. – Vol. 51. – № 10. – P. 2335-2352.

131. Randall R. B. Rolling element bearing diagnostics—a tutorial / R. B. Randall, J. Antoni // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – № 25(2). – P. 485–520.

132. Rao R. V. Mechanical Design Optimization Using Advanced Optimization Techniques / R. V. Rao; V. J. Savsani // Springer Series in Advanced Manufacturing. – 2012. – P. 35-67.

133. Rao R. Optimum design of rolling element bearings using genetic algorithms. / R. Rao; R. Tiwari // Mechanism & Machine Theory. – Feb. 2007 – Vol. 42. – № 2. – P. 233-250.

134. Rao R. V. Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. / R. V. Rao; V. J. Savsani // Computer-Aided Design. – Vol. 43. – № 3. – March 2011. – P. 303–315.

135. Sairajan K. K. A review of multifunctional structure technology for aerospace applications / K. K. Sairajan, G. S. Aglietti, K. M. Mani // *Acta Astronautica*. – 2016. – Vol. 120. – P. 30-42.
136. Sassi S. A numerical model to predict damaged bearing vibrations / S. SASSI, B. Badri, M. Thomas // *Journal of Vibration and Control*. – 2007. – Vol. 13. – № 11. – P. 1603-1628. DOI: 10.1177/1077546307080040.
137. Sawalhi N. Vibration response of spalled rolling element bearings: Observations, simulation and signal processing techniques to track the spall size/ N. Sawalhi, R. B. Randall // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2011. – № 25. – P. 846–870.
138. Sehgal R. Performance evaluation of bearings. / R. Sehgal - Rijeka, 2012. - 240 p.
139. Shah D. S. A review of dynamic modeling and fault identifications methods for rolling element bearing / D. S. Shah, V. N. Patel // *Procedia Technology*. – 2014. – № 14. – P. 447–456.
140. Shi C. Vibration mode structure and simplified modelling of cyclically symmetric or rotationally periodic systems / C. Shi, R. G. Parker // *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 471. – № 2173. – P. 20140672.
141. Sigmund O. Sensitivity filtering from a continuum mechanics perspective / O. Sigmund; K. Maute // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2012. – Vol. 46. – № 4. – P. 471-475.
142. Simpson T. W. Multidisciplinary Design Optimization for Complex Engineered Systems Design: Report from a National Science Foundation Workshop / T. W. Simpson, J. R. R. A. Martins // *Journal of Mechanical Design* – 2011. – Vol. 133. – № 10. - P. 101002-1–101002-10. doi:10.1115/1.4004465.
143. Simson E. A. A method of the analysis and optimization of construction elements of the technological systems / E. A. Simson, S. A. Nazarenko, I. D. Prevo // *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Technologies in mechanical engineering*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 187-192.
144. Simson E. A. Analyzing sensitivity of construction units under dynamic load / E. A. Simson, S. A. Nazarenko, S. I. Marusenko // *Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – №18 (1061). – P. 146 –150.

145. Simson E. A. Optimal design of multi-component structures of agricultural engineering / E. A. Simson, S. A. Nazarenko // Engineering of nature management. – 2016. – № 2 (6). – P. 74-80.

146. Simson E. A. Strength and dynamic analysis multicomponent cyclically symmetric structures (rolling bearings) / E. A. Simson, S. A. Nazarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 26 (1198). – P. 71-74. doi: 10.20998/2078-9130.2016.26.79933.

147. Simulation optimization: a review and exploration in the new era of cloud computing and big data / J. Xu [et al.] // Asia-Pacific Journal of Operational Research. – 2015. – Vol. 32. – № 03. – P. 1550019.

148. Stiemer M. Fully-coupled 3D Simulation of Electromagnetic Forming // M. Stiemer, J. Unger, H. Blum, B. Svendsen // ICHSF, Dortmund, Germany. – 2006. - P. 63–73.

149. Structural Topology Optimization of Multibody Systems / T. Ghandriz [et al.] // ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, Barcelona, Catalonia, Spain. – 2015. – 11 p.

150. Tada Y. Optimum Shape Design of Contact Surface with Finite Element Methods / Y. Tada, N. Nishihara// Advances in Engineering Software. – 1993. – Vol. 18. – P. 75-85.

151. Takezawa A. Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis / A. Takezawa, S. Nishiwaki, M. Kitamura //Journal of Computational Physics. – 2010. – Vol. 229. – P. 2697-2718.

152. Tian F. Automated generation of multiphysics simulation models to support multidisciplinary design optimization / F. Tian, M. Voskuijl / Advanced Engineering Informatics. – 2015. – Vol. 29. – № 4. – P. 1110-1125.

153. Topology optimization: a review for structural designs under vibration problems / S. Zargham [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2016. – Vol. 53. – № 6. – P. 1157-1177.

154. Tudose L. Optimal design of rolling-contact bearings via evolutionary algorithms / L. Tudose, C. Stănescu. - RKB technology review, 2011.- 13 p.

155. Tudose L. Optimal design under uncertainty of bearing arrangements/ L. Tudose, F. Rusu, C. Tudose // Mechanism and Machine Theory. – 2016. – Vol. 98. – P. 164-179.

156. Tudose L. Pareto Approach in Multi-Objective Optimal Design of Single-Row Cylindrical Rolling Bearings / L. Tudose, G. Kulcsar, C. Stănescu // Mechanisms and Machine Science. – 2013. – Vol. 13. – P. 519-528.

157. Turco E. Tools for the numerical solution of inverse problems in structural mechanics: review and research perspectives / E. Turco // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2016. – P. 1-46.
158. Upadhyay R. K. Rolling element bearing failure analysis: A case study / R. K. Upadhyay, L. A. Kumaraswamidhas, M. S. Azam // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. – Vol.1. – № 1. – 2013. – P. 15-17.
159. Wang Z. Multidisciplinary design optimization approach and its application to aerospace engineering / Z. Wang, W. Huang, L. Yan // *Chinese Science Bulletin*. – 2014. – Vol. 59. – № 36. – P. 5338-5353.
160. Weinzapfel N. Numerical modelling of sub-surface initiated spalling in rolling contacts / N. Weinzapfel, F. Sadeghi // *Tribology International*. – 2013. – Vol. 59. – P. 210-21.
161. Wohlmuth B. I. A mortar finite element method using dual spaces for the lagrange multiplier / B. I. Wohlmuth // *SIAM, Journal of Numerical Analysis*. – 2000. – Vol. 38. – P. 989-1012.
162. www.ansys.com.
163. Xia L. A superelement formulation for the efficient layout design of complex multi-component system / L. Xia, J. Zhu, W. Zhang // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2012. – Vol. 45. – № 5. – P. 643-655.
164. Xia L. Recent advances on topology optimization of multiscale nonlinear structures / L. Xia, P. Breitkopf // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2016. – P. 1-23.
165. Xie Y. M. A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization / Y. M. Xie, G. P. Steven // *Computers and Structures*. – 1993. – Vol. 49. – P. 885-896.

Keywords: многокомпонентные конструкции, динамика, контакт, оптимизация, технологические системы, подшипники качения, mechanics, cyclically symmetric structure, finite element method, rolling bearing, reduced order modeling techniques, optimization.

В работе сделан обзор по задачам динамического контактного нагружения и оптимизации многокомпонентных конструкций и процессов в технологических системах. Изложена классификация подходов к решению задач анализа и оптимизации для тел многокомпонентной структуры. Изучено состояние области исследований, касающейся сложного контактного динамического нагружения и оптимизации конструкции подшипниковых узлов качения.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назаренко Сергей Александрович – кандидат технических наук, НТУ
«ХПИ», тел.: (057) 700-29-72; e-mail: nazarenko_serzh@mail.ua.

Nazarenko Sergej Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior
Staff Scientist, National Technical University «KhPI», Department of Strength of
Materials, tel.: (057) 700-29-72; e-mail: nazarenko_serzh@mail.ua.